



Jorge Daniel Pereira Morais

Licenciado em Engenharia Mecânica

Deteção e localização de dano em estruturas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Raquel Albuquerque Soares Brás de Almeida,
Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Co-orientador: António Paulo Vale Urgueira,
Prof. Associado, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2014

Deteção e localização de dano em estruturas

Copyright © 2014 Jorge Daniel Pereira Morais, Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Sendo este trabalho um dos marcos mais importantes do meu percurso académico quero deixar aqui os meus agradecimentos a todos que fizeram parte e contribuíram para o sucesso do mesmo, em especial:

À professora Raquel Almeida agradeço pelo seu constante apoio e motivação disponibilizada ao longo de todo o meu trabalho bem como a sua colaboração em situações em que apenas uma discussão construtiva era possível para o avanço da investigação.

Ao professor António Urgueira agradeço pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas pontuais bem como algumas diretrizes que levaram ao sucesso do resultado final.

A todos os colegas que ao longo de todos estes anos fizeram desta etapa da vida uma experiência memorável, bem como o seu apoio fundamental em situações mais extremas. Deixo em particular um obrigado a Ana Vanessa Carvalho, João Horta, José Fernandes, Paulo Silva e Pedro Santos.

Deixo também um grande obrigado a João Reis e Fernando Gomes, amigos que sempre conseguiram aliviar a tensão dos momentos mais complicados bem como o seu apoio e confiança ao longo de toda a minha vida.

À Ana Raquel, agradeço por toda a compreensão e carinho nos momentos mais delicados deixando aqui um especial obrigado.

Aos meus pais, em que sem estes nada disto seria possível. Com o orgulho e amor que tenho por eles agradeço todos os valores transmitidos que me tornaram a pessoa que sou hoje e levaram ao sucesso deste trabalho. Da mesma forma deixo um agradecimento carinhoso ao meu irmão pela companhia e apoio.

Para além dos agradecimentos mais pessoais, deixo também aqui uma nota de gratidão ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), em particular à área de Mecânica Estrutural pelo fornecimento do equipamento e condições necessárias para a execução deste projeto.

RESUMO

A detecção de dano em estruturas é um problema que tem preocupado a comunidade científica nas últimas décadas. O grande objetivo das metodologias desenvolvidas até à data é a detecção do dano numa fase tão precoce quanto possível, evitando a existência de danos materiais e humanos e a possibilidade de falha catastrófica das estruturas.

Quando se fala de dano surgem cinco questões muito importantes que importa responder, (i) Existe dano? (Detecção), (ii) Onde está o dano? (Localização); (iii) Quanto e quão grave é o dano? (Quantificação), (iv) Que tipo de dano existe? (Classificação), e (v) Quanto tempo vai permanecer a estrutura operacional? (Previsão).

Neste trabalho pretende-se implementar vários métodos de detecção e localização de dano (desenvolvidos por diversos autores) e aferir sobre a sua eficiência e robustez quando são utilizados dados obtidos quer pela via numérica quer pela via experimental.

Por forma a tornar comparável os dados obtidos pelas duas vias, foi realizado um estudo numérico do efeito do ruído na eficiência dos vários métodos de detecção e localização do dano e desenvolvida uma nova abordagem que diminua as consequências do mesmo. Foi ainda estudada a influência da gama de frequências utilizada, bem como o estudo do efeito da localização das forças aplicadas na análise do dano. Para este último foram realizados diversos testes onde os indicadores foram submetidos a diferentes casos de excitação.

PALAVRAS-CHAVE:

Dano estrutural

Detecção de dano

Localização de dano

Funções de resposta em frequência (FRF)

Modos de vibração

Modos operacionais de vibração (MOV)

ABSTRACT

The detection of damage in structures is a problem that has concerned the scientific community in recent years. The ultimate goal of methodologies developed to date is the detection of damage at the earliest possible stage, thereby preventing any possibility of catastrophic failure of structures.

When speaking of damage, five very important questions must be answered: (i) Is there damage? (Detection); (ii) Where is the damage? (Location); (iii) What is the magnitude of the damage? (Quantification); (iv) What is the type of damage? (Classification), and (v) How long will the structure remain operational? (Forecast).

This paper intends to implement various methods of detection and location of damage (developed by several authors), and measure their efficiency and robustness using data obtained either numerically or by experimental means.

In order to compare the data obtained by both routes, a numerical study of the effect of noise in the efficiency of various methods of detection and location of damage was made. To minimize the consequences of noise in measured data a new approach was developed. The influence of the frequency range used, and the effect of the location of the forces applied on the analysis of damage in the structure were also taken into account. To this end, several tests were performed and the indicators were calculated for different cases of excitation.

KEYWORDS:

Structural Damage

Damage detection

Damage localization

Frequency Response Function (FRF)

Mode Shape

Operational Mode Shape (ODS)

ÍNDICE DE MATÉRIAS

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE DE MATÉRIAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
NOMENCLATURA.....	xv
SÍMBOLOS.....	xv
SIGLAS E ACRÓNIMOS.....	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. INTRODUÇÃO.....	3
2.2. EVOLUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	4
2.3. MÉTODOS TRADICIONAIS	4
2.3.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS.....	5
2.3.2 MODOS DE VIBRAÇÃO	7
2.3.3 MATRIZ DE FLEXIBILIDADE.....	15
2.3.4 <i>FREQUENCY RESPONSE FUNCTIONS</i> (FRFs).....	16
2.3.5 TRANSMISSIBILIDADES	24
2.4. MÉTODOS MODERNOS	27
2.4.1 WAVELET ANALYSIS.....	27
2.4.2 REDES NEURONAS ARTIFICIAIS.....	27
2.4.3 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG).....	27
2.5. ATIVIDADE CRONOLÓGICA	28
2.6. MÉTODOS ESCOLHIDOS.....	30
3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA	33
3.1. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO.....	33
3.1.1 IMPLEMENTAÇÃO DO AMORTECIMENTO	34
3.1.2 APLICAÇÃO DO DANO.....	34
3.1.3 IMPLEMENTAÇÃO DE RUÍDO	37

3.2	DETEÇÃO DE DANO	38
3.2.1	MAC	38
3.2.2	DRQ e AIGAC	39
3.2.3	TDI e WDI.....	41
3.2.4	COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DETECÇÃO.....	47
3.3	LOCALIZAÇÃO DE DANO.....	48
3.3.1	COMAC	48
3.3.2	<i>MODIFIED MODE SHAPES DIFERENCE</i> (MMSD)	49
3.3.3	<i>FRF SHAPED CURVATURE</i> (FRF_SC).....	50
3.3.4	<i>RESIDUAL IMAG FRF SHAPE</i> (RIFS).....	58
3.3.5	CONCEITO DE CURVATURA APLICADO ÀS RIFS	62
3.4	RESUMOS.....	66
3.4.1	DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DANO	66
4.	ESTUDO EXPERIMENTAL	67
4.1	DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO.....	67
4.1.1	APLICAÇÃO DO DANO	68
4.1.2	FREQUÊNCIAS NATURAIS, MODOS DE VIBRAÇÃO E FRFs	69
4.2	DETECÇÃO DO DANO.....	71
4.2.1	DRQ e AIGAC	71
4.2.2	TDI e WDI.....	72
4.3	LOCALIZAÇÃO DO DANO	74
4.3.1	<i>FRF SHAPED CURVATURE</i> (FRF_SC).....	74
4.3.2	<i>RESIDUAL IMAG FRF SHAPE</i> (RIFS).....	80
4.3.3	CURVATURA DE RIFS	82
5.	CONCLUSÕES	87
5.1	CONCLUSÕES.....	87
5.2	TRABALHO FUTURO.....	89
6.	BIBLIOGRAFIA	91
7.	ANEXOS	97
	ANEXO A.....	97
	ANEXO B	98
	ANEXO C	99
	ANEXO D	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Indústria petrolífera e aeroespacial	3
Figura 2.2- Modelo de elementos finitos da ponte Bill Emerson Memorial [12]	7
Figura 2.3- Representação gráfica de critério RVAC, adaptado de [39].....	20
Figura 3.1-Modelo da viga simulada numericamente	33
Figura 3.2-FRF com e sem amortecimento	34
Figura 3.3-Primeiros quatro modos de vibração da estrutura sem dano	36
Figura 3.4-Modos de vibração para diversos níveis de dano.....	36
Figura 3.5-Variação dos modos de vibração em pormenor	37
Figura 3.6-Aplicação do critério MAC para a situação sem ruído	39
Figura 3.7- Resultados obtidos através do indicador AIGAC e DRQ para situação numérica sem ruído	40
Figura 3.8- Influência do ruído nos resultados obtidos para os indicadores (a) DRQ (b) AIGAC	41
Figura 3.9- Resultados obtidos com o indicador TDI comparativamente a DRQ e AIGAC para 7 níveis de dano	42
Figura 3.10- Análise de pormenor dos resultados obtidos com o indicador TDI comparativamente ao indicador DRQ e AIGAC	42
Figura 3.11-Variação do indicador MRVAC para diversos níveis de dano (a) 1% (b) 10% (c) 30% (d) 50%	43
Figura 3.12- Aplicação do critério TDI e WDI com diferentes expoentes m e para 8 níveis de dano	44
Figura 3.13-Distribuição de MRVAC sujeito a ruído branco para nível de dano (a) 1% (b) 10% (c) 30% (d) 50%	45
Figura 3.14-Influência do ruído no indicador (a) TDI e (b) WDI.....	45
Figura 3.15-Efeito do expoente m no indicador WDI.....	46
Figura 3.16-Métodos de deteção de dano com aplicação de ruído branco de 2%	47
Figura 3.17- Análise em pormenor da comparação entre métodos de deteção de dano.....	47
Figura 3.18-Indicador COMAC para diversos níveis de dano	48
Figura 3.19-Aplicação do MMSD para os primeiros quatro modos de vibração	49
Figura 3.20- Efeito do somatório dos resultados obtidos em cada modo de vibração no indicador MMSD	50
Figura 3.21-Indicador FRF_SC para a gama de 0-400 Hz.....	51
Figura 3.22-Resultados obtidos com o sistema de contagem de ocorrências no indicador FRF_SC	51

Figura 3.23-Implementação do indicador FRF_SC (a) diferenças (b) ocorrências sujeito ao ruído branco de 2%	52
Figura 3.24- Efeito no número de intervalos na FRF.....	53
Figura 3.25- Efeito do número de intervalos no primeiro modo de vibração.....	54
Figura 3.26-Aplicação dos intervalos de frequência no indicador FRF_SC (a) de 1 Hz (b) de 4 Hz	54
Figura 3.27-Aplicação do indicador FRF_SC e a utilização de ocorrências (a) parte real (b) parte imaginária.....	55
Figura 3.28- Influência do ruído no indicador FRF_SC e ocorrências (a) Parte Real (b) Parte imaginária.....	56
Figura 3.29-Influência dos intervalos de frequência no indicador FRF_SC (parte real)	56
Figura 3.30-Influência dos intervalos de frequência no indicador FRF_SC (parte imaginária) ..	57
Figura 3.31-Esquema do método de localização de dano com parte imaginária, adaptado de [44]	58
Figura 3.32- Distribuição de NRIFS para situação sem ruído, força aplicada no ponto 3.	59
Figura 3.33- Aplicação do critério SUM_NRIFS e sistema de contagem de ocorrências	60
Figura 3.34-Resultados obtidos do indicador NRIFS, SUM_NRIFS e ocorrências de NRIFS para a situação de 2% ruído	60
Figura 3.35-Implementação dos intervalos de frequência nas <i>Normalized Residual Imag FRF Shapes</i>	61
Figura 3.36- Variação no método de NRIFS para diferentes posições da força de excitação da estrutura.....	62
Figura 3.37- Resultados obtidos com aplicação da segunda derivada às RIFS	63
Figura 3.38-Distribuição das curvaturas máximas normalizadas para o estado sem e com ruído respetivamente.....	64
Figura 3.39- Efeito dos intervalos de frequência para o método das curvaturas de RIFS (0-400 Hz)	64
Figura 3.40- Resultados obtidos com a banda ótima de frequências no método das curvaturas de RIFS	65
Figura 4.1-Características geométricas da viga em caso experimental	67
Figura 4.2- Instrumentação para análise estrutural do caso experimental.....	68
Figura 4.3 -Viga suspensa com montagem (esquerda) e aplicação do dano (direita)	68
Figura 4.4- Modos de vibração obtidos experimentalmente para os diversos níveis de dano	70
Figura 4.5-Variação das FRFs obtidas pelo acelerómetro 19 sujeito à força em 19	71
Figura 4.6- Resultados obtidos com os indicadores DRQ e AIGAC para o caso de estudo experimental.	72

Figura 4.7- Distribuição do indicador MRVAC para quatro diferentes níveis de dano aplicados ao caso de estudo experimental	73
Figura 4.8-Resultados do indicador (a) TDI e (b) WDI para diferentes números de forças incluída	73
Figura 4.9-Resultados obtidos com FRF_SC e nº de ocorrências associadas para a gama de 100-500 Hz.....	75
Figura 4.10- Aplicação de FRF_SC com (a) parte real (b) parte imaginária no caso experimental	75
Figura 4.11-Resultados obtidos com FRF_SC e ocorrências com intervalos de 4 Hz.....	76
Figura 4.12-Nº de ocorrências de FRF_SC com a parte real (a) força em 3 (b) força em 19.....	77
Figura 4.13- Nº de ocorrências de FRF_SC com a parte imaginária (a) força em 3 (b) força em 19	77
Figura 4.14- Indicador FRF_SC para diversos casos de excitação e efeito do somatório das mesmas com a utilização (a) valor complexo (b) parte real (c) parte imaginária	78
Figura 4.15-Distribuição de ocorrências do indicador FRF_SC (100-500 Hz)	79
Figura 4.16-Resultados obtidos pelas ocorrências associadas ao indicador FRF_SC (180-380 Hz)	79
Figura 4.17- Distribuição de NRIFS e contagem de ocorrências aquando a aplicação da força em 3	80
Figura 4.18- Distribuição de NRIFS e contagem de ocorrências aquando a aplicação da força em 19	80
Figura 4.19- Efeito dos intervalos de frequência no indicador NRIFS no caso experimental (100-500 Hz) (a) força em 3 (b) força em 19.....	81
Figura 4.20- Resultado obtido pelo indicador NRIFS com o somatório das forças existentes no caso experimental (100-500 Hz).....	82
Figura 4.21- Mapa de distribuição das curvaturas das RIFS normalizadas e contagem de ocorrências para força 3	82
Figura 4.22- Mapa de distribuição das curvaturas das RIFS normalizadas e contagem de ocorrências para força 19	83
Figura 4.23- Efeito dos intervalos de frequência no indicador Curv_RIFS (a) força 3 (b) força 19	83
Figura 4.24- Aplicação do somatório das forças para curvaturas de RIFS (100-500 Hz).....	84
Figura 4.25- Distribuição das ocorrências (curvaturas máximas) de RIFS (somatório das forças envolvidas)	84
Figura 4.26-Método das curvaturas de RIFS otimizado (150-270 Hz)	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1-Comparação entre métodos de detecção/localização de defeitos, adaptado de [15]	9
Tabela 2.2- Métodos de detecção e localização de dano de acordo com o ano e tipo de dados utilizado.....	29
Tabela 3.1- Propriedades do material constituinte.....	33
Tabela 3.2-Progressão do dano na simulação numérica.....	35
Tabela 3.3-Frequências Naturais para diferentes níveis de dano obtidos numericamente	35
Tabela 3.4-Critério MAC para os diversos níveis de dano.....	38
Tabela 3.5- Resumo dos métodos de detecção de dano para caso numérico	66
Tabela 3.6-Resumo de métodos de localização de dano para caso numérico	66
Tabela 4.1-Localização das forças aplicadas.....	67
Tabela 4.2-Aplicação de dano para 8 estágios.....	68
Tabela 4.3- Variação das frequências naturais perante os diversos níveis de dano	69

NOMENCLATURA

SÍMBOLOS

ω	Frequência
K	Rigidez
M	Massa
C	Amortecimento
d	Dano/danificada
$\Delta\omega_A$	Variação de frequência em A
S	Matriz de sensibilidades
$*$	Complexo conjugado
ϕ	Modo de vibração
$(\phi)'$	1ª Derivada do modo de vibração
$(\phi)''$	2ª Derivada do modo de vibração
ψ	Modo de vibração com base na extensão
a_r	Fator modal de escala
λ_r	Polo do sistema
G_f	Matriz de flexibilidade dinâmica
x	Deslocamento
x'	Velocidade
x''	Aceleração

F	Força aplicada
H	Receptância
H_j	Modo operacional de vibração
H_i	Ponto i do modo operacional de vibração
FI/FD	Amplitude da FRF (sã e danificada)
H'	1ª Derivada da receptância (inclinação)
H''	2ª Derivada da receptância (Curvatura/rotação)
u_{norm}	Normalização à unidade
τ_{rs}	Transmissibilidade entre receptância no ponto r e s
E	Módulo de Young
ρ	Densidade volúmica
L	Comprimento
ν	Coeficiente de Poison
G	Módulo de elasticidade transversal
h	Espessura

SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADSM	<i>Absolute Difference Strain Modeshape</i>
AG	Algoritmos Genéticos
AIGAC	<i>Average Integration of Global Amplitude Correlation</i>
AIGSC	<i>Average Integration of Global Shape Correlation</i>
COMAC	<i>Co-ordinate Modal Assurance Criterion</i>
DI	<i>Damage Index method</i>
DLAC	<i>Damage Location Assurance Criterion</i>
DRQ	<i>Detection and Relative damage Quantification indicator</i>
FDAC	<i>Frequency Domain Assurance Criterion</i>
FI	<i>Flexibility Index</i>
FRAC	<i>Frequency Response Assurance Criterion</i>
FRF_MS	<i>FRF based Mode Shape</i>
FRF_MSC	<i>FRF Based Mode Shaped Curvature</i>
FRF_MSCS	<i>FRF Based Mode Shaped Curvature Square</i>
FRF_MSS	<i>FRF Based Mode Shape Slope</i>
FRF_SC	<i>FRF Shape Curvature</i>
FRF	<i>Frequency Response Function</i>
GAC	<i>Global Amplitude Correlation Function</i>
GDL	Grau De Liberdade
GSC	<i>Global Shape Correlation Function</i>
MAC	<i>Modal Assurance Criterion</i>
MDLAC	<i>Multi Damage Location Assurance Criterion</i>
MDS	<i>Measured Damage Signature</i>
MEF	Modelo de Elementos Finitos
MOV	Modo Operacional de Vibração

MRVAC	<i>Multiple Response Vector Assurance Criterion</i>
MSAC	<i>Mode Shape Amplitude Comparison</i>
MSCS	<i>Mode Shape Curvature Square</i>
MSECR	<i>Modal Strain Energy Change Ratio</i>
MSE	<i>Modal Strain Energy</i>
MSS	<i>Mode Shape Slope</i>
NFN	Normalização de Frequências Naturais
NRIFS	<i>Normalized Residual Imag FRF Shape</i>
ODS	<i>Operacional Deflection Shape</i>
PDS	<i>Predicted Damage Signature</i>
RN	Redes Neurais
RVAC	<i>Response Vector Assurance Criterion</i>
TDI	<i>Transmissibility Damage Indicator</i>
WDI	<i>Weighted Damage Indicator</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Com o aumento da complexidade de novos equipamentos e estruturas, torna-se cada vez mais importante prevenir e detetar o dano numa fase tão precoce tanto possível evitando desta forma não só a ocorrência de danos materiais e perdas humanas mas também longos tempos de reparação das mesmas.

O efeito das vibrações mecânicas em estruturas é muitas vezes associado a comportamentos de fadiga que podem levar à sua ruína. No entanto a análise das mesmas pode também trazer inúmeras vantagens, uma destas é a capacidade de oferecer uma monitorização contínua.

A monitorização contínua tem como objetivos principais detetar e localizar danos, estes têm sido alvo de diversos estudos, como seja a formulação de diversos critérios e indicadores que têm como missão conseguir encontrar o dano o mais precoce possível.

Esta dissertação tem como objetivo estudar a eficiência de diversas metodologias, utilizando quer dados obtidos através de modelação numérica, quer dados recolhidos da via experimental.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo avaliar os métodos de deteção e localização de dano, que utilizem dados obtidos a partir da análise de vibrações, nomeadamente, frequências naturais, modos de vibração, modos operacionais de vibração e transmissibilidades de movimento. De entre o conjunto de métodos identificados, foi decidido estudar e comparar a eficiência de alguns deles para a etapa de deteção e/ou a localização de dano.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação estará dividida em cinco principais capítulos, nomeadamente:

CAPÍTULO 1:

Introdução - Apresentação da motivação para realização deste trabalho bem como os objetivos a atingir.

CAPÍTULO 2:

Revisão Bibliográfica - Apresentação de vários métodos de deteção e localização de dano tradicionais, onde são utilizados parâmetros modais, tais como: frequências naturais, modos de vibração, alteração na flexibilidade, FRFs e transmissibilidades. É exposto também uma breve apresentação de métodos de avaliação de dano modernos onde são utilizadas ferramentas de tratamento de sinal avançadas como algoritmos genéticos, redes neuronais e *wavelet analysis*. Após a apresentação do estado da arte serão enumerados os métodos selecionados para avaliação e posterior implementação neste trabalho.

CAPÍTULO 3:

Simulação numérica - Apresentação do estudo realizado recorrendo à simulação numérica para gerar dados a utilizar nos vários métodos implementados. Para tal foram utilizados, dados obtidos a partir do modelo de elementos finitos desenvolvido utilizando o *software* MATLAB, de uma viga na situação de apoio livre-livre. Neste capítulo é também apresentada uma nova metodologia, desenvolvida pelo autor, com o intuito de minimizar a influência que o ruído presente nos dados parece ter nos resultados obtidos com os vários métodos implementados.

CAPÍTULO 4:

Estudo experimental – Nesta segunda fase recorreu-se à utilização de dados recolhidos da via experimental para a implementação dos métodos escolhidos. Tinha-se como objetivo verificar se os resultados obtidos utilizando dados recolhidos da via experimental eram coerentes com os constados na simulação numérica.

CAPÍTULO 5:

Conclusão – Neste capítulo será feita a discussão final dos resultados obtidos, retiradas as principais conclusões, salientadas as contribuições propostas e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente complexidade das estruturas foi necessário desenvolver técnicas de inspeção por forma a assegurar a sua estabilidade bem como a segurança de quem as utiliza, tornando-se assim a pesquisa e avaliação de dano uma crescente área de estudo.

Apesar da existência de técnicas de deteção de dano não destrutivas [1] de que são exemplo: as correntes induzidas, raios X, ultra-sons, líquidos penetrantes e inspeção visual, a ocorrência de catástrofes ou acidentes continua a verificar-se. Isto fica a dever-se ao facto da análise efetuada por estas técnicas ser local e não global, ou seja, a avaliação da estrutura é realizada apenas em determinadas áreas e não na sua totalidade, uma vez que tal processo é não só dispendioso mas também demorado. A situação ideal seria pois conseguir obter uma monitorização contínua do estado global da estrutura.

Dada a necessidade de detetar o dano o mais precocemente possível, o desenvolvimento de técnicas eficazes de monitorização contínua tornou-se o principal objetivo de vários investigadores. Uma das abordagens tem como base o estudo da influência do dano na estrutura ao nível do seu comportamento dinâmico, nomeadamente na alteração das características espaciais da estrutura, como massa, rigidez e o amortecimento, uma vez que estas irão influenciar as propriedades modais (frequências naturais, modos de vibração e constantes de amortecimento).

Os desenvolvimentos mais recentes na área da análise de dano em estruturas, utilizando vibrações mecânicas, derivam dos estudos realizados no início da década de 70 na área da manutenção da indústria petrolífera e aeroespacial. As primeiras abordagens eram baseadas em modelos numéricos que correlacionavam as propriedades modais obtidas na avaliação de componentes intactos e danificados.



Figura 2.1-Indústria petrolífera e aeroespacial

2.2 EVOLUÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

Com o início da utilização de vibrações mecânicas na detecção de dano, foram diversos os métodos desenvolvidos. *Rytter* [2] identifica quatro níveis para a completa caracterização do dano sendo possível a categorização dos diversos métodos de acordo com a sua capacidade para:

Nível 1. Determinar a **existência** de dano na estrutura;

Nível 2. **Localizar** o dano

Nível 3. **Quantificar** o dano

Nível 4. Estimar o **tempo de vida** da estrutura

Park et al [3] divide as diferentes técnicas em duas classes principais: métodos onde a detecção do dano necessita de um modelo numérico teórico prévio da estrutura e os métodos experimentais que utilizam apenas os dados obtidos pela via experimental. Outros trabalhos se seguiram, *Carden* em [4] descreve a evolução dos desenvolvimentos estudados acerca da detecção de dano, focando os métodos que conseguem satisfazer os três primeiros níveis de *Rytter* [2].

Yan et al [5], refere o progresso dos métodos modernos em relação aos métodos tradicionais onde são utilizadas as respostas das vibrações estruturais obtidas através de monitorização *online*, recorrendo a ferramentas avançadas de tratamento de sinal.

2.3 MÉTODOS TRADICIONAIS

Métodos tradicionais são maioritariamente baseados nas alterações das características estruturais do sistema (massa, rigidez ou amortecimento) influenciando desta forma propriedades modais como as frequências naturais ou modos de vibração. Sendo que a presença do dano tem influência nestas, diversos autores propõem o estudo desse facto para conseguir detetar e/ou localizar o dano numa estrutura.

2.3.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS

Como é referido em diversa literatura, a ocorrência de dano numa estrutura está, na grande maioria das vezes, associada a uma redução da sua rigidez e consequentemente das suas frequências naturais, tal é perceptível com a observação da equação (2.1).

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.1)$$

Onde K e M dizem respeito à rigidez e massa respetivamente.

As alterações observadas nas frequências naturais conseguem facultar a ferramenta necessária a diversos métodos de avaliação de dano em estruturas. Vantagens associadas remetem à fácil obtenção das mesmas e à sua independência do ponto de medição, a sua determinação pode ser conseguida através de técnicas clássicas de análise experimental, com custos de implementação reduzidos

De acordo com *Doeling et al* [6] e *Sinou* [7] o primeiro artigo que propõe a deteção de dano através da comparação das frequências naturais medidas na estrutura com e sem dano foi apresentado por *Lifshitz and Roten* [8].

Salawu et al. [9] apresenta um artigo de revisão onde são referidas as dificuldades verificadas em diversos métodos de deteção de dano através de alterações nas frequências naturais da estrutura, antes e depois do dano ocorrer.

Sinou [7] refere o critério de Normalização de Frequências Naturais (NFN) para a deteção de dano, este tem como base o rácio entre a i -éssima frequência natural danificada e não danificada.

$$NFN_i = \frac{\omega_i^d}{\omega_i} \quad (2.2)$$

onde d diz respeito à estrutura danificada.

Para além de deteção e localização, *Kim et al* [10] propõe encontrar a dimensão geométrica do dano. Para tal o autor relaciona as diferenças fracionadas da energia modal com as alterações fracionadas nas frequências naturais, verificando a fiabilidade e precisão do método para uma viga em regime livre-livre.

Messina et al [11] propõe o *Damage Location Assurance Criterion* (DLAC) baseado nas alterações das frequências naturais e assumindo a presença de um único dano, através de:

$$DLAC_i = \frac{|\Delta\omega_A^T \cdot \Delta\omega_B(i)|^2}{(\Delta\omega_A^T \cdot \Delta\omega_A) \left((\Delta\omega_B(i))^T (\Delta\omega_B(i)) \right)} \quad (2.3)$$

Onde $\Delta\omega_A$ representa o vetor com as variações experimentais das frequências naturais e $\Delta\omega_B(i)$ o vetor obtido teoricamente com as variações de frequência quando o dano se encontra na posição i . T representa a transposta da matriz respectiva. O valor 0 indica a inexistência de correlação e o valor 1 uma correlação perfeita e assim sendo a localização do dano na posição i .

Uma das desvantagens da utilização de frequências naturais prende-se com o fato de que a presença de mais do que um dano poder provocar a mesma alteração em termos do comportamento dinâmico que a existência de um único dano. Neste âmbito *Messina et al* [11] apresenta uma alteração do indicador por forma a contemplar as situações de danos múltiplos, sendo o novo indicador chamado de *Multi Damage Location Assurance Criterion* (MDLAC):

$$MDLAC_i = \frac{|\Delta\omega_A^T \cdot S \delta x_i|^2}{(\Delta\omega_A^T \cdot \Delta\omega_A) \left((S \delta x_i)^T (S \delta x_i) \right)} \quad (2.4)$$

onde S define a matriz de sensibilidades que contém as derivadas de primeira ordem das n frequências naturais em relação às m variáveis de dano x . O objetivo deste indicador é encontrar o vetor δx_i que torna o MDLAC igual a 1. A matriz de sensibilidades é dada por:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{\partial \omega_1}{\partial x_1} & \frac{\partial \omega_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \omega_1}{\partial x_m} \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial x_1} & \frac{\partial \omega_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \omega_2}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \omega_n}{\partial x_1} & \frac{\partial \omega_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \omega_n}{\partial x_m} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Koh e Dyke [12] realizam um estudo que aborda as capacidades e limitações de diversos algoritmos de pesquisa de dano, entre estes é referenciado o método proposto de *Messina et al* [11]. O método é testado num modelo numérico referente a uma ponte suspensa onde é verificado que o sucesso do método é mais dependente de um grupo de frequências naturais específico que a utilização do número máximo de frequências naturais adquirido.

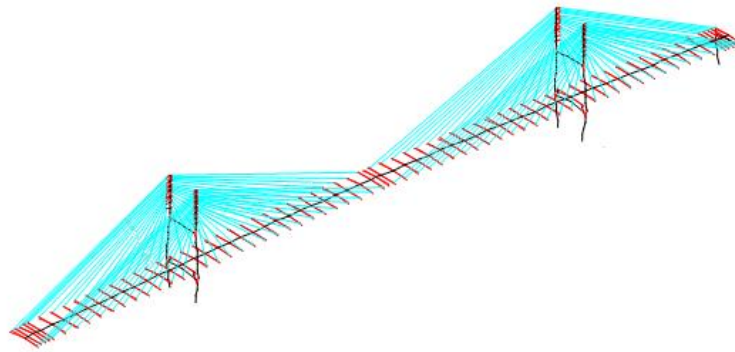


Figura 2.2- Modelo de elementos finitos da ponte Bill Emerson Memorial [12]

2.3.2 MODOS DE VIBRAÇÃO

Para além da utilização de frequências naturais, diversos autores propuseram a utilização dos modos de vibração para a deteção e localização do dano. Segundo estes o modo de vibração é uma característica única da descrição espacial que um sistema mecânico adquire quando vibra a uma das suas frequências naturais, assim sendo a presença do dano refletir-se-á neste parâmetro provocando alterações.

A desvantagem associada ao uso dos modos de vibração prende-se com a necessidade de ser utilizado um grande número de pontos de medição experimentais para conseguir recriar os modos de vibração com precisão, principalmente modos relativos a altas frequências. Outra desvantagem a relatar prende-se à necessidade de se realizar uma análise modal aos dados obtidos para a obtenção dos modos de vibração.

2.3.2.1 ALTERAÇÕES NOS MODOS DE VIBRAÇÃO

De acordo com *Doebbling et al* [6], West [13] apresenta a primeira tentativa de utilização sistemática dos modos de vibração na localização de dano em estruturas. O autor utiliza o *Modal Assurance Criterion* (MAC) para determinar o nível de correlação entre os modos de vibração de um componente de um veículo espacial não danificado e os modos de vibração do mesmo componente depois de ter sido exposto a cargas acústicas. O critério MAC desenvolvido compara o modo i com o j da seguinte forma:

$$MAC(\phi_i, \phi_j) = \frac{\left| \sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_i)_k^* \right|^2}{\left(\sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_j)_k^* \right) \left(\sum_{k=1}^n (\phi_i)_k (\phi_i)_k^* \right)} \quad (2.6)$$

Onde $*$ representa o complexo conjugado e k representa o elemento do vetor do modo de vibração ϕ . O valor de MAC varia entre 0 e 1, este usa as propriedades de ortogonalidade dos modos de vibração para comparar dois modos. Assim, se os modos de vibração i (referente à estrutura intacta) e j (referente à estrutura danificada) forem idênticos o valor do indicador será 1, caso exista um dano o indicador reverte para 0.

Apesar do critério MAC providenciar um bom indicador para a detecção do dano, este apresenta dificuldades na localização deste. O *Co-ordinate Modal Assurance Criterion* (COMAC) [14] é então proposto a partir do MAC original e consegue identificar a coordenada onde dois modos de vibração não coincidem. O fator COMAC no ponto i entre dois modos de vibração é dado por:

$$COMAC(i) = \frac{\left(\sum_{j=1}^n \left| (\phi_A)_{ij} (\phi_B^*)_{ij} \right| \right)^2}{\sum_{j=1}^n \left| (\phi_A)_{ij} \right|^2 \sum_{j=1}^n \left| (\phi_B)_{ij} \right|^2} \quad (2.7)$$

Onde n representa o número de modos de vibração a correlacionar e $(\phi_A)_{ij}$ e $(\phi_B)_{ij}$ denota o valor do modo j no ponto i para o estado A (com dano) e B (sem dano).

Allemang [15] realiza um estudo profundo relativamente à utilização do critério MAC. Em alternativa à utilização dos modos de vibração convencionais derivados a partir de medições obtidas com a utilização de acelerómetros, *Yoo et al* [16] utilizou modos de vibração obtidos com base na medição da extensão (*strain mode shapes*) (ψ), utilizando para tal extensómetros. Para a

localização do dano o autor utiliza a diferença absoluta dos mesmos apresentando o *Absolute Difference Strain Modeshape* (ASDM):

$$ASDM = |\psi_I - \psi_D| \quad (2.8)$$

Onde D e I dizem respeito à estrutura com e sem dano respetivamente.

Ao contrário de critério COMAC, este método identifica a localização do dano em cada modo de vibração, a sua variação indica a correlação que existe entre vetores. O aumento de ASDM indica a diminuição da correlação que existe entre os modos de vibração, confirmando consequentemente a presença do dano.

Yoo *et al* [16] relata ainda a limitação deste critério, em que para um intervalo de 10 modos, o número de identificações de dano é reduzido, como alternativa apresenta o indicador que definiu como *New Method*:

$$Newmethod = \left| |\psi_I| - |\psi_D| \right| \quad (2.9)$$

Onde a diferença absoluta dos valores absolutos dos modos de vibração com base na extensão, ψ , é responsável pela maximização das identificações de dano em cada modo, conseguindo apresentar resultados superiores aos encontrados pelo ASDM.

Tabela 2.1- Comparação entre métodos de deteção/localização de defeitos, adaptado de [15]

Parameter Type Comparison method	MAC	CoMAC	ASDM	New method
Sensitivity	○	⊙	□	○
Crack detection	●	●	●	●
Crack location	※	●	●	●
Time efficiency	○	△	⊙	⊙
Merits	Crack detection is possible and the size of crack identification is possible.	Identification of comparatively exact crack location is possible.	The identification of crack location in each mode is possible.	The identification of crack location in all mode is possible. It is superior in sensitivity to ASDM.
Demerits	Crack detection is possible, but the identification of crack location is impossible.	Time efficiency is bad. The CoMAC solution is a little complex.	Standardization of each mode is needed. (The difference of sensitivity is comparative large according to strain mode shape)	Hard to find physical meanings.

(⊙ : Very good, ○ : good, □ : normal, △ : not good, ※ : impossible, ● : possible)

Lam et al [17] propõe um método de detecção de dano, em que considera diferentes casos de dano e compara as variações provocadas nos modos de vibração e nas frequências naturais. Para tal o autor considera o rácio entre a variação do modo de vibração medido (entre a estrutura sã e danificada), $\{\phi_i\}$, com a variação da frequência natural do respetivo modo, ω_i num determinado caso de dano, formulando então o *Measured Damage Signature* (MDS):

$$\{MDS_i\} = \frac{\Delta\{\phi_i\}}{\Delta\omega_i^2} \quad (2.10)$$

Assumindo que existem m casos de dano, estes irão influenciar m parâmetros, como exemplo: $p_1, p_2 \dots p_k, p_m$, e consequentemente as variações dos modos de vibração e frequências naturais. Para o modo i e caso de dano k , a influência é demonstrada por:

$$\Delta\{\phi_i\} = \frac{\partial\{\phi_i\}}{\partial p_k} \Delta p_k \quad (2.11)$$

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{\partial\omega_i^2}{\partial p_k} \Delta p_k \quad (2.12)$$

Considerando este fato, *Lam et al* [17] propõe o *Predicted Damage Signature* (PDS):

$$\{PDS_i\} = \frac{\frac{\partial\{\phi_i\}}{\partial p_k}}{\frac{\partial\omega_i^2}{\partial p_k}} \quad (2.13)$$

Assim, o autor propõe a comparação entre assinaturas em cada modo de vibração i de forma a verificar a extensão do dano correspondente.

Devido à carga computacional envolvida na comparação entre assinaturas para cada caso de dano ser elevada o autor propõe a utilização do critério MAC para a correlação entre os valores conseguindo obter resultados superiores.

Ho e Ewins [18] propõem a diferença absoluta entre modos de vibração com e sem dano, onde a localização do dano é dada pela diferença máxima na coordenada i :

$$\Delta\phi_{ij} = \left| \phi_{i,j}^{dano} - \phi_{i,j} \right| \quad (2.14)$$

Se mais de um modo j é utilizado surge o *Mode Shape Amplitude Comparison* (MSAC):

$$MSAC_i = \sum_j \Delta \phi_{i,j} \quad (2.15)$$

Para além da formulação de MSAC, *Ho e Ewins* [18] propõem *Flexibility Index* (FI) e *Mode Shape Slope* (MSS):

$$FI_i = \sum_j \left| \left(\phi_{i,j}^{dano} \right)^2 - \left(\phi_{i,j} \right)^2 \right| \quad (2.16)$$

$$MSS_i = \sum_j \left| \left(\left(\phi_{i,j}^{dano} \right)' \right)^2 - \left(\left(\phi_{i,j} \right)' \right)^2 \right| \quad (2.17)$$

Onde $\left(\phi_{i,j} \right)$ representa o modo de vibração j na coordenada i e $\left(\phi_{i,j} \right)'$ a derivada de 1ª ordem deste.

Elshafey et al [19] propõe a diferença de modos de vibração da estrutura sã e danificada para a localização do dano. No entanto, ao contrário do realizado por *Ho e Ewins* [18], o autor utiliza a diferença dos modos normalizados à unidade.

2.3.2.2 CURVATURAS DOS MODOS DE VIBRAÇÃO

Para além dos métodos que utilizam a correlação entre modos de vibração na estrutura com dano e sem dano, como forma de deteção de dano, *Pandey et al* [20] apresenta o conceito de curvatura, esta é definida como a segunda derivada do modo de vibração, obtida por aproximação através do método das diferenças finitas.

A determinação da curvatura da coordenada de medição i do modo de vibração j é dada por:

$$\phi_{i,j}'' = \frac{\phi_{i-1,j} - 2.\phi_{i,j} + \phi_{i+1,j}}{h^2} \quad (2.18)$$

Onde h é a distância entre o ponto de medição $i-1$ e $i+1$

Pandey et al [20] sugere como forma de localizar o dano, a utilização da diferença absoluta observada entre a curvatura do modo com e sem dano, ou seja:

$$\Delta \phi_{ij}'' = \left| \left(\phi_{i,j}^{dano} \right)'' - \left(\phi_{i,j} \right)'' \right| \quad (2.19)$$

onde $\left(\phi_{i,j}^{dano}\right)''$ corresponde ao valor da curvatura observado no ponto i do modo j da estrutura com dano e $\left(\phi_{i,j}\right)''$ o mesmo mas agora para a estrutura sem qualquer dano, o ponto que registar maior valor de $\Delta\left(\phi_{i,j}\right)''$ corresponde ao ponto de máximo dano.

Se mais do que um modo for contabilizado então:

$$MS_i = \sum_j \Delta\phi_{i,j}'' \quad (2.20)$$

Para além das diferenças absolutas. *Ho e Ewins* [18] define o *Mode shape curvature square* (MSCS):

$$\Delta\left(\phi_{i,j}\right)''^2 = \left| \left(\phi_{i,j}^{dano}\right)''^2 - \left(\phi_{i,j}\right)''^2 \right| \quad (2.21)$$

Se mais do que um modo for utilizado teremos então:

$$MSCS_i = \sum_j \Delta\phi_{i,j}''^2 \quad (2.22)$$

Stubbs et al [21], apresentou outro indicador de dano que também utiliza as curvaturas dos modos e que batizou como *Damage Index method* (DI) e se encontra abaixo apresentado:

$$\beta_{ij} = \frac{\left(\int_a^b \left[\left(\phi_j^{dano}\right)''(x) \right]^2 dx + \int_0^L \left[\left(\phi_j^{dano}\right)''(x) \right]^2 dx \right) \int_0^L \left[\left(\phi_j\right)''(x) \right]^2 dx}{\left(\int_a^b \left[\left(\phi_j\right)''(x) \right]^2 dx + \int_0^L \left[\left(\phi_j\right)''(x) \right]^2 dx \right) \int_0^L \left[\left(\phi_j^{dano}\right)''(x) \right]^2 dx} \quad (2.23)$$

onde $\left(\phi_j^{dano}\right)''$ e $\left(\phi_j\right)''$ corresponde à segunda derivada do modo j da estrutura com e sem dano respetivamente, a e b são os limites do segmento i da viga onde o dano está a ser avaliado e L é o comprimento total da viga. Sendo que para mais de um modo de vibração, o indicador é definido por:

$$DI_i = \sum_j \beta_{ij} \quad (2.24)$$

2.3.2.3 MODAL STRAIN ENERGY (MSE)

Shi et al [22] propõe a utilização de um indicador definido como *Modal Strain Energy Change Racio* (MSECR) para localizar o dano, este indicador é baseado na alteração da *Modal Strain Energy* (MSE) em cada ponto de medição após a ocorrência de dano. Se o ponto de medição a estudar for j e o modo de vibração considerado i , temos para a situação sem dano:

$$MSE_{ij} = \phi_i^T K_j \phi_i \quad (2.25)$$

Onde K_j corresponde ao elemento j da matriz de rigidez sem dano, e para a situação com dano temos

$$MSE_{ij}^{dano} = \left(\phi_i^T \right)^{dano} K_j \left(\phi_i \right)^{dano} \quad (2.26)$$

onde dano representa a situação da estrutura danificada, e ϕ_i o modo de vibração i . Como a localização do dano é desconhecida o autor propõe uma aproximação da matriz de rigidez afirmando que o dano irá refletir-se na redução de rigidez num determinado ponto alterando a *MSE*. Desta forma define então o *Modal Strain Energy Change Racio* (MSECR) como:

$$MSECR_j^i = \frac{|MSE_{ij}^d - MSE_{ij}|}{MSE_{ij}} \quad (2.27)$$

Se mais do que um modo de vibração for considerado, $MSECR_j$ do elemento j é dado pela média da soma de $MSECR_j^i$, normalizada perante o valor máximo em cada modo:

$$MSECR_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{MSECR_j^i}{MSECR_{max}^i} \quad (2.28)$$

Para além de *Shi et al* [22], *Cornwell et al* [23] aplica MSE a casos de estudo referentes a placas, necessitando apenas dos modos de vibração antes e após a ocorrência de dano, não sendo necessário a sua normalização em relação à matriz de massa.

2.3.2.4 SENSIBILIDADES

Outra classe de métodos de análise de dano é baseada na alteração nas sensibilidades dos modos de vibração perante a mudança da rigidez estrutural. Tais métodos são denominados por *sensitivity based update methods*. Um estudo sobre diversos trabalhos levados a cabo por vários investigadores que utilizam este critério para a deteção e localização de dano é apresentado em Hemez [24] e Doebling *et al* [25].

A sensibilidade do grau de liberdade (GDL) i para o modo de vibração j e para a rigidez, K , entre os graus de liberdade p e q é definida por:

$$\frac{\partial \phi_{ij}}{\partial K_{pq}} = (\phi_{pj} - \phi_{qj}) \sum_{r=1, r \neq j}^n \frac{1}{\lambda_r - \lambda_j} \frac{\phi_{pr} \phi_{qr}}{a_r} \phi_{ir} \quad (2.29)$$

onde λ são os polos do sistema e a_r os fatores modais de escala associados aos modos em estudo.

A sensibilidade do grau de liberdade i para o modo de vibração j e para a massa local, M , no grau de liberdade k é estimado por:

$$\frac{\partial \phi_{ij}}{\partial M_k} = -\lambda_j \frac{\phi_{kj}^2}{a_j} \phi_{ij} + \phi_{kj} \sum_{r=1, r \neq j}^n \frac{\lambda_j^2}{\lambda_r - \lambda_j} \frac{\phi_{kr} \phi_{ir}}{a_r} \quad (2.30)$$

n define o número de modos utilizado para a aproximação do indicador de sensibilidade.

Doebling *et al* [25] afirma que geralmente, mesmo utilizando um número limitado de modos de vibração é possível obter, com boa aproximação, os valores das sensibilidades. O autor refere ainda, que para dados onde a presença de ruído se verifica (ex. dados experimentais), o cálculo das sensibilidades em relação à massa é numericamente mais estável que o associado à rigidez.

Parloo *et al* [26] propõe uma técnica baseada nas alterações na massa e rigidez do sistema através da análise das sensibilidades dos modos de vibração. Para o cálculo destas sensibilidades é necessário conhecer as frequências naturais e modos de vibração normalizados em relação à matriz de massa. Este método está dependente do número de modos utilizados de modo a garantir uma maior resolução espacial.

2.3.3 MATRIZ DE FLEXIBILIDADE

Uma abordagem alternativa para a identificação de dano utiliza a matriz de flexibilidades para estimar alterações no comportamento estático da estrutura. Como a matriz de flexibilidades G_f , é definida pela inversa da matriz de rigidez estática, esta vai relacionar a força aplicada com o deslocamento resultante. No entanto esta pode ser determinada a partir dos modos de vibração normalizados em relação à massa, ϕ , e pelos quadrados das frequências naturais, Λ .

$$[G_f] \approx [\phi][\Lambda]^{-1}[\phi]^T \quad (2.31)$$

A formulação da matriz de flexibilidade desta forma fornece simplesmente uma aproximação, uma vez que somente alguns modos de vibração da estrutura são medidos e não todos os realmente existentes (regra geral os mais baixos).

A detecção de dano é conseguida através da comparação entre a matriz de flexibilidade calculada a partir dos modos de vibração obtidos para a estrutura danificada com a mesma matriz mas utilizando os modos vibração obtidos para a estrutura sem qualquer dano.

Yan e Golinval [27] apresentam um método de diagnóstico baseado nas alterações medidas na flexibilidade e rigidez das estruturas, onde a matriz de flexibilidade é calculada a partir da pseudo-inversão da matriz rigidez, tornando estas as matrizes “referência”. Como tal, a localização do dano é alcançada através da comparação entre as alterações das duas matrizes relativamente ao estado sem dano (referência) e danificado. Como a localização do dano é dada diretamente pela posição dos sensores não é necessário medição geométrica nem análises de elementos finitos [5].

Doebling et al [25] refere alguns dos trabalhos mais significativos na aplicação da flexibilidade dinâmica dividindo-os em cinco classes, nomeadamente:

- Comparação entre as alterações na flexibilidade;
- *Unity check method*;
- Método do erro na matriz de rigidez;
- Efeitos da flexibilidade residual;
- Alterações na matriz de rigidez

Yan et al [5] conclui no seu trabalho que a matriz de rigidez fornece mais informação que a matriz de massa, mas apenas para defeitos de dimensão superiores onde a alteração é significativa, para defeitos pequenos os métodos não têm resultados tão positivos.

2.3.4 FREQUENCY RESPONSE FUNCTIONS (FRFs)

2.3.4.1 BREVE DESCRIÇÃO TEÓRICA DO CONCEITO DE FRF

A equação de equilíbrio dinâmico para um sistema complexo de múltiplos graus de liberdade e com amortecimento viscoso é frequentemente descrito por:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} + [D]\{\dot{x}(t)\} = \{f(t)\} \quad (2.32)$$

Onde $[M]$, $[K]$ e $[D]$ representam as matrizes de massa, rigidez e amortecimento respetivamente, $\{x(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$ e $\{\ddot{x}(t)\}$ os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração para o instante t de tempo, e $\{f(t)\}$ representa o vetor de força exterior aplicado.

Para o caso de excitação harmónica, o vetor de força pode ser descrito por:

$$\{f(t)\} = Fe^{i\omega t} \quad (2.33)$$

E a resposta do sistema a cada frequência, ω , definida por:

$$\{x(t)\} = Xe^{i\omega t} \quad (2.34)$$

Assim, substituindo as equações (2.34) e (2.35) na equação (2.32), a relação entre a resposta e a excitação a cada frequência é dada por:

$$(-\omega^2 [M] + i\omega [D] + [K])\{X\} = \{F\} \quad (2.35)$$

Consequentemente a relação entre a resposta X e a excitação F a cada frequência ω é exposta como:

$$[H(\omega)]\{X\} = \{F\} \rightarrow [H(\omega)] = (-\omega^2 [M] + i\omega [D] + [K])^{-1} \quad (2.36)$$

Em que $[H(\omega)]$ é a matriz de receptância que contém toda a informação sobre as características dinâmicas do sistema. Cada elemento $H_{i,j}(\omega)$ da matriz corresponde a uma FRF individual que descreve a resposta de uma coordenada i a uma força aplicada na coordenada j , ou seja:

$$H_{i,j}(\omega) = \frac{X_i}{F_j} \quad (2.37)$$

É de notar que os Modos Operacionais de Vibração (MOV) (em inglês chamados de *Operational Deflection Shapes*) descrevem a forma (no espaço) exibida pela estrutura a cada frequência de excitação ω . Quando sujeita a uma força unitária, o vetor coluna da matriz de receptância $H_j(\omega)$, representará o modo operacional de vibração.

2.3.4.2 UTILIZAÇÃO DE FRFs PARA A DETECÇÃO DE DANO

Vários investigadores propõem a deteção de dano através da utilização direta de FRFs, em detrimento dos dados obtidos a partir da identificação modal nomeadamente, os modos de vibração e as frequências naturais. Wang [28] refere a vantagem de utilizar FRFs em vez de parâmetros modais devido ao facto de os dados provenientes das FRFs providenciarem mais informação numa dada gama de frequências que os dados fornecidos pelos modos de vibração, onde a informação se restringe às frequências naturais.

Lee e Shin [29] desenvolveram um método de deteção de dano baseado em FRFs medidas. O dano é equivalente à alteração no módulo de elasticidade. A estratégia utilizada é baseada na redução do domínio do problema onde, através de um processo iterativo, as zonas intactas são excluídas restando apenas as zonas suspeitas de dano. Para além da estratégia referida, o autor refere como vantagem do método, o facto de este utilizar os modos de vibração da estrutura intacta e as FRFs da estrutura danificada. A viabilidade do método foi testada com modelos numéricos, tendo sido afirmado que este permite a deteção de dano desde que o ruído presente nas FRFs não ultrapasse um determinado limite, que neste estudo correspondeu a 9%.

Uma abordagem alternativa foi realizada por Park *et al* [3], de forma a reduzir o volume de experimentação, os autores propõem um método de deteção de dano na subestrutura, onde a análise de dano não é realizada na estrutura completa mas nas subestruturas que a compõem.

Araújo dos Santos *et al* [30] propõe um método de identificação de dano baseado nas sensibilidades das FRFs, com a sua aplicação a uma estrutura laminada os autores verificaram que a gama de frequências a avaliar e o ponto de aplicação da excitação são fatores determinantes para o sucesso da metodologia.

Conforme é referido em [31], determinados fatores ambientais podem ter forte influência nos parâmetros estruturais, como tal *Limongelli* [32] tentou verificar essa influência e para tal desenvolveu o *Interpolation Damage Detection Method (IDDM)*. O método identifica o dano existente através da diferença entre o deslocamento medido num ponto e o deslocamento calculado por meio de uma função de interpolação para a mesma localização. Esta função é criada através da leitura dos deslocamentos medidos nos diversos locais, equipados com um sensor. Com o desenvolvimento do método, *Limongelli* [32] verifica a influência do ruído e da temperatura no caso de estudo experimental correspondente à ponte I-40 no Novo México, tendo verificado que a temperatura, para níveis baixos de ruído, não influencia os resultados do método proposto.

Bovio et al [33] propõe um indicador que avalia as variações das FRFs de um sistema quando se verifica a presença de dano com o objetivo de obter diretamente as dimensões do dano através de:

$$Index = \frac{\sum_{i=1}^n |FI_i - FD_i|}{\sum_{i=1}^n FI_i} \quad (2.38)$$

Onde FI_i e FD_i representam a amplitude da FRF para a estrutura intacta e danificada à frequência i . Este indicador traduz-se pelo rácio entre a diferença da média aritmética da FRF da estrutura intacta e danificada, e a média aritmética da FRF da estrutura intacta, para a gama de frequências estudada.

Para além de *Sinou* [7], *Allemang* [15] refere a extensão do critério de MAC ao domínio das funções de resposta em frequência, o primeiro caso referido diz respeito ao trabalho de *Heylen* e *Lammens* [34] que propõem o *Frequency Response Assurance Criterion (FRAC)*:

$$FRAC_{ij}(\omega) = \frac{\left| H_{i,j}^d(\omega) (H_{i,j}(\omega))^* \right|^2}{\left(H_{i,j}(\omega) (H_{i,j}(\omega))^* \right) \left(H_{i,j}^d(\omega) (H_{i,j}^d(\omega))^* \right)} \quad (2.39)$$

onde o índice d diz respeito à estrutura danificada e $*$ representa o complexo conjugado. $FRAC_{ij}$ varia entre 0 e 1 sendo que a proximidade a 0 indica a presença de dano. Neste caso, a excitação é aplicada na coordenada j obtendo-se uma resposta na coordenada em i .

Pascual et al [35] propõe quantificar a correlação entre dois Modos Operacionais de Vibração, o indicador referido é então calculado por:

$$FDAC(\omega_1, \omega_2) = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (H_i^d(\omega_2)(H_i^*(\omega_1))) \right|^2}{\sum_{i=1}^n (H_i(\omega_1)(H_i^*(\omega_1))) \sum_{i=1}^n (H_i^d(\omega_2)((H_i^d)^*(\omega_2)))} \quad (2.40)$$

onde i representa a coordenada de medição e n o número total de coordenadas medidas. A medição da correlação é realizada entre o MOV da estrutura danificada (de índice d) a cada frequência ω_2 e o MOV da estrutura intacta a cada frequência ω_1 .

Uma simplificação do critério FDAC é proposta em [36] e é baseada na medição da correlação entre os MOVs da estrutura danificada e não danificada à mesma frequência, para uma única força aplicada. Este novo critério foi denominado por *Response Vector Assurance Criterion* (RVAC) [37] (ver Figura 2.3 para representação gráfica):

$$RVAC(\omega) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N H_i^d(\omega)(H_i^*(\omega)) \right|^2}{\sum_{i=1}^N (H_i(\omega)(H_i^*(\omega))) \sum_{i=1}^N (H_i^d(\omega)(H_i^{d*}(\omega)))} \quad (2.41)$$

onde N diz respeito ao número de coordenadas e $*$ diz respeito ao complexo conjugado.

Se mais que uma força é considerada é possível retirar várias medições, variando a posição j da força aplicada (M posições) e somar os resultados obtidos, originando:

$$RVAC(\omega) = \frac{\left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M H_{ij}^d(\omega)(H_{ij}^*(\omega)) \right|^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (H_{ij}(\omega)(H_{ij}^*(\omega))) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (H_{ij}^d(\omega)(H_{ij}^{d*}(\omega)))} \quad (2.42)$$

Sampaio et al [38] realiza uma adaptação do critério RVAC formulando o *Detection and Relative damage Quantification indicator* (DRQ):

$$DRQ = \frac{\sum_{\omega} RVAC(\omega)}{N_{\omega}} \quad (2.43)$$

Sendo que N_{ω} corresponde ao número total de frequências estudada. Este critério é traduzido pelo valor médio do critério RVAC na gama de frequências definida. Este varia entre 1 e 0 representando o valor 1 a estrutura sem qualquer dano, a aproximação do valor para 0 corresponde ao aumento do mesmo.

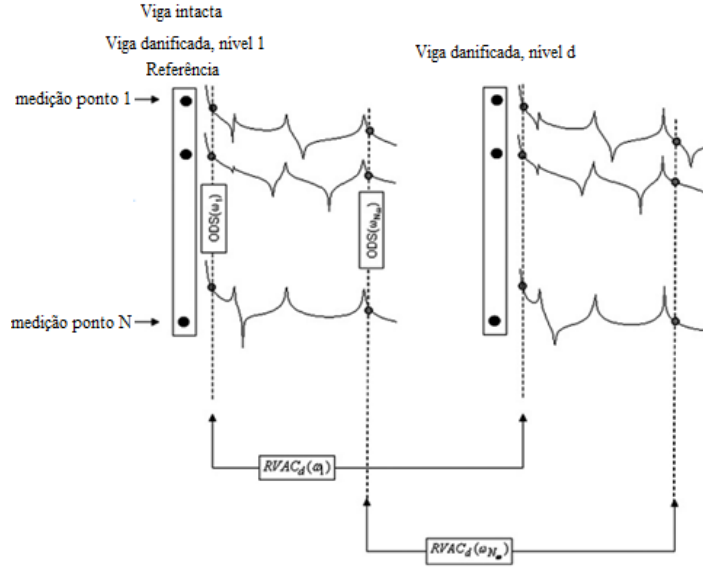


Figura 2.3- Representação gráfica de critério RVAC, adaptado de [39]

Com o intuito de apenas detetar a existência de dano Zang *et al* [40],[41] propõe o *Global Shape Correlation Function* (GSC) onde, para uma dada força aplicada, calcula

$$GSC(\omega) = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (H_{i,j}^*(\omega) H_{i,j}^{dano}(\omega)) \right|^2}{\sum_{i=1}^n (H_{i,j}^*(\omega) H_i(\omega)) \sum_{i=1}^n \left((H_{i,j}^{dano}(\omega))^* H_{i,j}^{dano}(\omega) \right)} \quad (2.44)$$

$H_{i,j}(\omega)$ Representa o valor da receptância, H , da estrutura sem dano, no ponto de medição i , para uma dada força aplicada j , a uma dada frequência ω , e $H_{i,j}^{dano}(\omega)$ o mesmo mas agora para a estrutura com dano. O número total de pontos de medição é n e o índice $*$ representa o complexo conjugado.

Na continuação do seu trabalho Zang *et al* [40],[41] apresenta o segundo critério de correlação, baseado na amplitude das respostas. Este indicador é denominado por *Global Amplitude Correlation Function* (GAC):

$$GAC(\omega) = \frac{2 \cdot \left| \sum_{i=1}^n (H_{i,j}^*(\omega) H_{i,j}^{dano}(\omega)) \right|}{\sum_{i=1}^n (H_{i,j}^*(\omega) H_i(\omega)) + \sum_{i=1}^n \left((H_{i,j}^{dano}(\omega))^* H_{i,j}^{dano}(\omega) \right)} \quad (2.45)$$

Para além do desenvolvimento desses indicadores, os autores propõem os indicadores AIGSC e AIGAC onde é calculada a média dos valores obtidos para os indicadores acima referidos, de modo a englobar todos os resultados obtidos para a gama de frequências estudada:

$$AIGSC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GSC(\omega_i) \quad (2.46)$$

$$AIGAC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GAC(\omega_i) \quad (2.47)$$

Onde N é o número de frequências utilizado na gama considerada.

O AIGSC e o AIGAC terão valores entre 0 e 1 indicando a presença ou ausência de dano respetivamente.

À semelhança do trabalho de *Ho e Edwins* [18], *Maia et al.* [42] utiliza a diferença absoluta entre as receptâncias das FRFs obtidas da estrutura com e sem dano para a localização do dano. Para cada frequência, ω , e com a força aplicada em k , a variação é dada por:

$$\Delta H_{i,k}(\omega) = \left| H_{i,k}^{dano}(\omega) - H_{i,k}(\omega) \right| \quad (2.48)$$

Se várias frequências e forças forem consideradas, o indicador, denominado por *FRF based Mode Shape* (FRF_MS) é representado por:

$$FRF_MS_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta H_{i,k}(\omega) \quad (2.49)$$

Para além da diferença absoluta entre FRFs da estrutura intacta e danificada para localização de dano, *Maia et al* [42] apresenta a utilização da derivada de primeira ordem das FRFs medidas, esta é representada por:

$$H'_{i,j}(\omega) = \frac{H_{i-1,j}(\omega) - H_{i+1,j}(\omega)}{h^2} \quad (2.50)$$

Onde h é a distância entre o ponto de medição $i-1$ e $i+1$ e j a localização da força aplicada.

A diferença absoluta da derivada de 1ª ordem ao quadrado é representada pelo *FRF Based Mode Shape Slope* (FRF_MSS):

$$\Delta \left(H'_{i,k}(\omega) \right)^2 = \left| \left(\left(H_{i,k}^{\text{dano}}(\omega) \right)' \right)^2 - \left(\left(H_{i,k}(\omega) \right)' \right)^2 \right| \quad (2.51)$$

Em que, para uma dada gama de frequências consideradas e um conjunto de forças aplicadas o indicador é dado por:

$$FRF_MSS_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta \left(H'_{i,k}(\omega) \right)^2 \quad (2.52)$$

2.3.4.3 CURVATURAS DAS FRFS

Na continuação do seu trabalho, *Maia et al.* [43] implementa o conceito de curvatura às FRFs medidas, através de:

$$H''_{i,k}(\omega) = \frac{H_{i+1,k}(\omega) - 2.H_{i,k}(\omega) + H_{i-1,k}(\omega)}{h^2} \quad (2.53)$$

Com o conceito de curvatura, *Maia et al* [42] apresenta diversos indicadores. O primeiro remete à diferença absoluta entre as curvaturas das FRFs medidas na estrutura intacta e danificada, para cada frequência ω :

$$\Delta H''_{i,k}(\omega) = \left| H''_{i,k}{}^d(\omega) - H''_{i,k}{}^i(\omega) \right| \quad (2.54)$$

De modo a localizar o dano é possível, para cada ponto de medição i , considerar a soma do indicador a todas as frequências na gama de interesse. Se diversas forças, k , forem aplicadas então é formulado o *FRF based Mode Shaped Curvature* (FRF_MSC), também denominado por *FRF Shape Curvature* (FRF_SC):

$$FRF_MSC_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta H''_{i,k}(\omega) \quad (2.55)$$

De modo a evidenciar a presença de dano para níveis de dano inferiores, *Maia et al* [42] apresenta a variação absoluta entre o quadrado das curvaturas, este é apresentado como *FRF based Mode Shaped Curvature Square* (FRF_MSCS):

$$\Delta(H_{ik}''(\omega))^2 = \left| (H_{ik}''^d(\omega))^2 - (H_{ik}''(\omega))^2 \right| \quad (2.56)$$

onde, para diversas frequências e forças aplicadas:

$$FRF_MSCS_i = \sum_{\omega} \sum_k \Delta(H_{ik}''(\omega))^2 \quad (2.57)$$

2.3.4.4 UTILIZAÇÃO DA PARTE IMAGINÁRIA DA FRF

A definição completa de uma FRF (secção 2.3.4.1) obriga a que sejam conhecidos, para cada frequência, os valores da sua amplitude e fase ou então os valores da parte real e imaginária, uma vez que se trata de uma função complexa. Para os métodos atrás descritos são utilizadas ambas as partes da função complexa, a parte real e imaginária, no entanto existem autores que exploraram a vertente de utilizar apenas uma das componentes da FRF de modo a estudar o seu efeito e vantagens associadas.

Liu et al [44] propõe as *Residual Imag FRF Shapes*, utilizando somente a parte imaginária da FRF para tentar localizar o dano em estruturas. Para tal calcula o valor da diferença máxima da situação com e sem dano a cada frequência ω para uma dada força j .

$$\Delta_{imag_FRF_{ij}}(\omega, u_{norm}) = \text{imag_FRF}_{ij}(\omega, u_{norm}) - \text{imag_FRF}_{ij}^{dano}(\omega, u_{norm}) \quad (2.58)$$

Onde u_{norm} representa a normalização à unidade

A sucessiva normalização, nomeadamente após a obtenção da parte imaginária da *FRF* e posteriormente na diferença entre as FRFs nos dois estados, consegue melhorar os resultados obtidos.

Para além da utilização da diferença máxima, foi ainda aplicado o conceito de curvatura às *Residual Imag FRF Shapes*, verificando-se que a dupla derivação beneficia a localização do dano. Ainda com o intuito de melhorar o método proposto, Liu et al [44] utiliza técnicas como *GSM* e *Wavelet transform* de modo a intensificar o desvio provocado pela presença do dano.

2.3.5 TRANSMISSIBILIDADES

Um das principais motivações que levou vários autores [39],[45] a utilizar transmissibilidades provêm do facto de serem quantidades locais relacionadas apenas com os zeros das FRFs e não com os seus polos. A formulação do conceito de transmissibilidade pode ser encontrada em diversa literatura [46],[47] no entanto abaixo é apresentado uma pequena introdução.

Como é referido em [47] as amplitudes nas coordenadas desconhecidas U, $\{X_U\}$, e coordenadas conhecidas K, $\{X_K\}$, devidas a um conjunto de forças aplicadas nas coordenadas A da estrutura, podem ser relacionadas. Considerando então que:

$$\{X_U\} = [H_{UA}]\{F_A\} \quad (2.59)$$

$$\{X_K\} = [H_{KA}]\{F_A\} \quad (2.60)$$

Eliminando F_A , as respostas das coordenadas U e K podem ser relacionadas a partir de:

$$\{X_U\} = [H_{UA}][H_{KA}]^{-1}\{X_K\} \Rightarrow \{X_U\} = [T_{UK}]\{X_K\} \quad (2.61)$$

onde $[T_{UK}] = [H_{UA}][H_{KA}]^{-1} \quad (2.62)$

corresponde à matriz de transmissibilidades.

A inversão de $[H_{KA}]$ referida na equação (2.61) implica que o número de coordenadas K seja igual ao número de coordenadas A ($\#K=\#A$). Se tal não acontecer ($\#K \geq \#A$) uma pseudo-inversão terá de ser realizada.

Como é verificado pelas equações acima referidas, se as coordenadas $\{X_K\}$ forem medidas, as respostas $\{X_U\}$ podem ser calculadas desde que a matriz $[T_{UK}]$ seja conhecida; uma vez que $\{F_A\}$ foi eliminada entre as equações (2.59) e (2.60), $[T_{UK}]$ não depende da magnitude dessas força; os elementos de $[T_{UK}]$ são muitas vezes denominados por transmissibilidades multivariáveis.

Por outro lado, se forem divididas duas quaisquer respostas podemos chamá-las de transmissibilidades “diretas”. Assim sendo várias transmissibilidades podem ser obtidas, contudo estas serão dependentes da magnitude das forças, bem como da sua localização. Por exemplo, se a equação (2.61) for dividida por uma amplitude de resposta conhecida X_s , então:

$$X_U / X_s = T_{UK} X_k / X_s \Rightarrow \tau_{Us} = T_{UK} \tau_{Ks} \quad (2.63)$$

Se apenas uma força for aplicada na coordenada j e apenas duas coordenadas forem relacionadas, digamos, r e s , os dois tipos de transmissibilidades coincidem e tudo se simplifica por:

$$\tau_{rs} \equiv T_{rs} = X_r / X_s = H_{rj} / H_{sj} \quad (2.64)$$

É de notar que as forças aplicadas não tem de ser necessariamente harmónicas, apesar da formulação das expressões o terem admitido, tais continuam a ser válidas para outros tipos de excitação.

Maia et al [39] propõe a deteção e quantificação relativa de dano, para tal aplica uma reformulação do critério RVAC, aplicada agora a transmissibilidades:

$$RVAC(\omega) = \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} d \tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{\tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} \left[d \tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{d \tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right] \sum_{r=1}^{N-1} \left[\tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{\tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right]}, s = r + 1 \quad (2.65)$$

onde τ_{rs} representa a transmissibilidade entre coordenadas r e s e $\bar{}$ o complexo conjugado.

Considerando várias medições, variando a posição j da força aplicada (em M posições) e somando os resultados, surge o *Multiple Response Vector Assurance Criterion* (MRVAC) [48]:

$$MRVAC = \sum_{\omega} \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M d \tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{\tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left[d \tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{d \tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right] \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left[\tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{\tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right]}, s = r + 1 \quad (2.66)$$

Utilizando o critério MRVAC, *Maia et al* [39] apresenta o *Transmissibility Damage Indicator* (TDI):

$$TDI = \frac{1}{N_{\omega}} MRVAC \quad (2.67)$$

O critério TDI representa a correlação entre transmissibilidades de pares de coordenadas para uma gama de N_{ω} frequências. O seu valor encontra-se entre 0 e 1 sendo que a proximidade a 0 indica a presença de elevado dano.

Embora o indicador tenha sucesso na deteção de dano, esta apenas é evidenciada para níveis superiores de dano, de modo a contornar esta dificuldade, *Almeida et al* [48] propõe o *Weighted Damage Indicator* (WDI):

$$WDI = \sum_{i=1}^M \left(n_i \cdot \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_i} MRVAC \right)_i^m}{N^{m+1}} \right) \quad (2.68)$$

em que N é o número total de frequências consideradas.

Almeida et al [48] verificou que para pequenos níveis de dano, os valores de MRVAC apresentavam baixa correlação somente para um reduzido número de frequências, logo a sua presença iria ser dissimulada aquando a aplicação da média proposto pelo indicador TDI, assim sendo foi formulado o indicador WDI.

O indicador WDI vai analisar cada valor de MRVAC ao longo de toda a gama de frequências, posteriormente os mesmos são categorizados em M intervalos contabilizando o número n_i de vezes que cada valor de MRVAC se encontra dentro de cada um dos intervalos considerados. É ainda definido um expoente positivo e maior que 1 (representado por m na equação (2.68)) que visa aumentar a capacidade de deteção precoce do dano numa situação de monitorização contínua da estrutura em estudo. Tal como para o indicador TDI a aproximação do valor de WDI a zero corresponde ao aumento do dano presente.

2.4 MÉTODOS MODERNOS

Diversos autores propõem métodos mais avançados, estes denominados por modernos ou métodos de diagnóstico de dano inteligentes, este tipo de metodologias utiliza ferramentas de tratamento de sinal avançadas e/ou inteligências artificiais [5]. Como técnicas representantes desta classe existe redes neuronais artificiais, algoritmos genéticos, *wavelet analysis*, entre outras, que serão de seguida brevemente resumidas.

2.4.1 WAVELET ANALYSIS

A utilização de uma *Wavelet analysis* tem diversas aplicações na área de deteção de dano estrutural. Sendo esta uma ferramenta de processamento de sinal estacionário consegue oferecer vantagens como a deteção de um sinal singular e a separação do ruído do sinal obtido em experimentação, como tal, diversos autores utilizam esta ferramenta para o melhoramento dos indicadores de dano.

2.4.2 REDES NEURONAIS ARTIFICIAIS

Redes neuronais (RN) utilizam algoritmos mais avançados que conseguem adaptar-se à estrutura em análise, oferecendo uma forte habilidade de mapeamento. No entanto, para a deteção e localização de dano, primeiro é necessário serem submetidos a um processo de “aprendizagem” onde são fornecidos dados de experimentação já verificados, de modo a treinar as RNs. Após este treino a Rede neural está apta a funcionar, sendo apenas necessário introduzir dados experimentais, conseguindo esta fornecer a localização e identificar o nível de dano presente.

2.4.3 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)

Tal como RNs, a aplicação de algoritmos genéticos são uma técnica importante para a área de deteção de dano estrutural, pois consegue fornecer a localização do dano em diversas situações sendo independente dos detalhes do objeto em causa. Um algoritmo genético possui alta eficiência a nível de cálculo de dados, conseguindo em simultâneo reduzir tempos de computação para a deteção de dano em estruturas complexas.

São diversos os autores que utilizam ferramentas de tratamento de sinal avançado, *Yan et al* [5] nomeia alguns dos trabalhos que ajudaram a impulsionar esta vertente.

2.5 ATIVIDADE CRONOLÓGICA

Como é possível verificar, a detecção e localização de dano através da análise de componentes de vibração tem sido alvo de diversos estudos e está em constante desenvolvimento. De seguida é apresentado um quadro cronológico onde são referenciados alguns dos principais estudos encontrados de acordo com os elementos utilizados.

Tabela 2.2- Métodos de detecção e localização de dano de acordo com o ano e tipo de dados utilizado

Ano	Frequências Naturais	Modos de Vibração	Flexibilidade	FRFs	Transmissibilidades	Mistos	Reviews
1969	Lifshitz and Rotem [8]						
1979	Cawley and Adams [49]						
1986		West [13]					
1988		Lieven and Ewins [14]					
1991		Pandey et al. [20]					
1993						Hemez [24]	Rytter [2]
1994			Pandey and Biswas [50]		Chen et al. [51]		
1995	Hasan [52]	Lam et al. [17]					
1996				Heylen and Lammens [34]			Doebling et al. [6]
1997				Wang et al. [28] Maia et al. [43]	Schulz et al. [53]		Salawu [9]
1998	Messina et al. [11]	Shi et al. [22]		Thyagarajan et al. [54]			
1999	Shifrin and Ruotolo [55]	Yoo et al. [16] Cornwell et al. [23]		Sampaio et al. [56]	Zhang et al. [57]		
2000	Lee and Chung [58]	Ho and Ewins [18]		Ratcliffe [59]			
2001	Morassi [60]				Maia et al. [47] Sampaio et al. [61]		
2002		Parloo et al. [62]		Lee and Shin [29]			
2003	Kim and Stubbs [10]	Parloo et al. [26]		Zang et al. [40], [41] Maia et al. [42]		Kim et al. [63] Vanlanduit et al. [64]	Allemang [15]
2004							Carden and Fanning [4]
2005			Yan and Golinval [27]	Araújo dos Santos et al. [30] Selcuk [65] Park and Park [3]			
2006				Bovio et al. [33] Maia et al. [66]			Montalvão et al. [36]
2007		Koh and Dyke [12]					Yan et al. [5]
2009				Liu et al. [44]			Sinou [7]
2010			Reynders and De Roeck [67]	Limongelli [32]		Tomaszewski [68]	
2011		Radziński et al. [69] Elshafey et al. [19]	Yang and Sun [70]		Maia et al. [39] Almeida et al. [48]		
2012				Huang et al. [71]			
2013						Dawari and Vesmawala [72]	Chesné and Deraemaeker [45]

Para além dos avanços realizados ainda existe diversos aspetos que carecem de atenção nomeadamente em áreas como:

Modelação numérica: Devido a estruturas mais complexas a modelação torna-se lenta, não conseguindo oferecer total confiança na comparação com dados experimentais, desenvolvimentos em áreas como os métodos modernos são uma vertente cada vez mais emergente;

Extração de dados: otimização da posição e número de sensores a utilizar de modo a reduzir custos de manutenção e aumentar eficiência;

Influências em casos teóricos e práticos: Estudar os efeitos de fatores externos ao procedimento experimental como ruído e temperatura;

Aplicação de métodos para a mesmas situações e a sua complementaridade: Realizar estudos para a mesma situação experimental de modo a verificar as limitações e vantagens de cada um de forma a ser possível a combinação/ou colaboração em casos reais;

Focar noutros níveis de Rytter: Para além de detetar e localizar dano é necessário estudar a quantificação de forma a tornar possível a previsão do tempo de vida de uma estrutura.

2.6 MÉTODOS ESCOLHIDOS

Após a apresentação dos diversos métodos de deteção e localização de dano, a próxima etapa foi selecionar alguns destes, proceder à sua implementação, por forma a verificar vantagens e fragilidades associadas.

No estudo numérico, foram implementados na etapa relativa à deteção de dano, os seguintes indicadores:

- Critério MAC [13], que identifica a existência de dano através do nível de correlação verificado entre os modos de vibração da estrutura com e sem dano;
- Indicadores DRQ [38] e AIGAC [40], que utilizam as FRFs obtidas para a estrutura com e sem dano;
- Indicadores TDI [39] e WDI [48] que fazem uso das transmissibilidades de deslocamento.

Relativamente à etapa de localização do dano, as metodologias implementadas para o modelo numérico foram:

- Método das Curvaturas, nomeadamente o indicador FRF_SC apresentado por *Maia et al* [42], este indicador será também aplicado às partes reais e imaginária da receptância individualmente, por forma a verificar as possíveis vantagens na utilização isolada de cada uma das partes;
- Utilização da parte imaginária da FRF residual (*Residual Imag FRF Shape*) bem como o conceito de curvatura aplicada a esta (*Curvature of Residual Imag FRFs*), apresentado por *Liu et al* [44];
- Implementação do critério COMAC [14], onde a correlação entre modos de vibração é responsável pela localização do dano;
- *Modified Mode Shape Difference* [19], onde a localização do dano é dada pela coordenada onde ocorre diferença máxima entre modos de vibração normalizados, da estrutura sã e danificada, a cada modo de vibração estudado.

Os métodos já utilizados na modelação numérica utilizarão da mesma forma os valores medidos experimentalmente, no entanto as técnicas que utilizam modos de vibração não serão abordadas, focando o estudo apenas nas metodologias que utilizam variações nas FRFs e transmissibilidades.

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO

Para a simulação numérica foi criado um modelo de elementos finitos de uma viga em regime livre-livre (Figura 3.1) através do *software* MATLAB. A estrutura é constituída por 1000 elementos de viga, elementos estes que respeitam a teoria de vigas de Timoshenko. Cada um dos elementos integrantes contém uma determinada massa e rigidez bem como um determinado comprimento (que neste caso correspondeu a 1 mm). Ainda de salientar que cada elemento de viga possui 2 nós (1001 nós no total), onde cada um destes possui dois graus de liberdade (u_y, θ_z) pretendendo-se desta forma estudar o comportamento dinâmico da viga no plano XY.

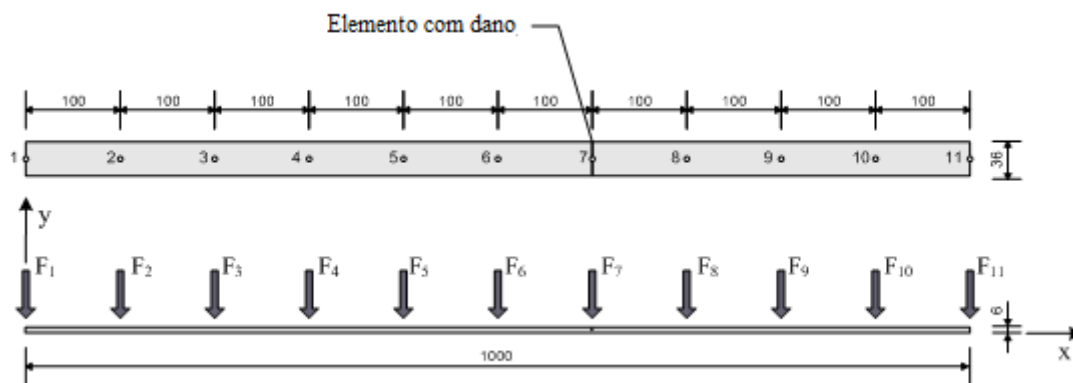


Figura 3.1-Modelo da viga simulada numericamente

Relativamente às dimensões da viga, esta possui 1000 mm de comprimento com uma secção transversal de $6 \times 36 \text{ mm}^2$, as propriedades do material constituinte estão referidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Propriedades do material constituinte

Módulo de Young (E)	210 GPa
Densidade volúmica (ρ)	7850 Kg/m ³
Coefficiente Poisson (ν)	0.3
Módulo de elasticidade transversal (G)	80.8 GPa

Na Figura 3.1 estão também representados os 11 pontos de excitação com um espaçamento entre si de 100 mm, estes estão localizados no lado oposto aos pontos de medição, simulando uma situação real de ensaio experimental. As receptâncias finais obtidas para cada ponto de medição correspondem à média de 10 medições.

3.1.1 IMPLEMENTAÇÃO DO AMORTECIMENTO

Para o modelo numérico foi considerada a existência de um amortecimento do tipo proporcional representado por:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3.1)$$

Onde $[M]$ e $[K]$ dizem respeito às matrizes de massa e rigidez respectivamente e α e β são variáveis de proporção.

Para a seleção do valor do amortecimento proposto foi realizado diversos testes com diferentes valores de α e β , em que foi observado o efeito que as mesmas tinham na FRF obtida. O valor escolhido correspondeu a $\alpha = 1.0E^{-5}s^{-1}$ e $\beta = 1.0E^{-5}s$, o efeito do amortecimento na resposta do sistema é ilustrado na Figura 3.2.

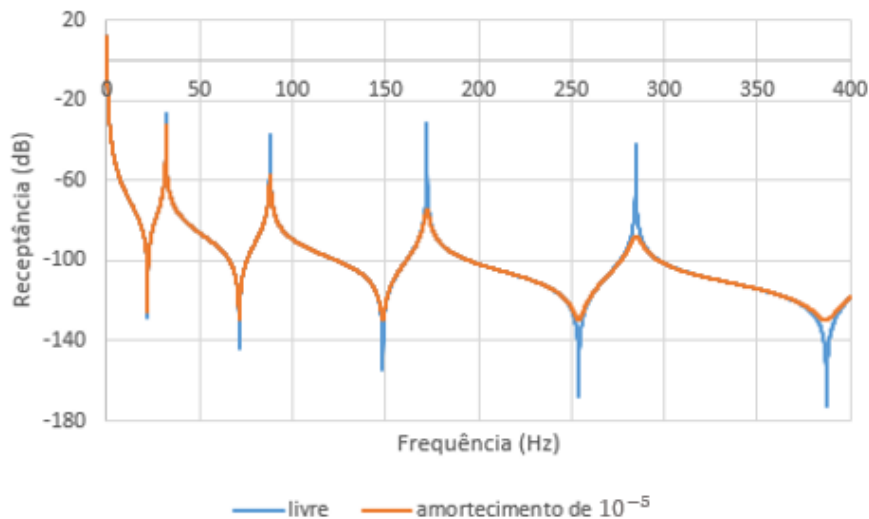


Figura 3.2-FRF com e sem amortecimento

3.1.2 APLICAÇÃO DO DANO

O dano provocado é traduzido pela redução de espessura, h , no elemento 600 (referente ao 7º ponto de medição), conseqüentemente o segundo momento de área (I) do mesmo diminuí e assim sendo a rigidez local é alterada. Este tipo de procedimento pretende simular a implementação de um dano do tipo fissura (devido ao comprimento do próprio elemento). A progressão do dano para 8 níveis de dano é representada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2-Progressão do dano na simulação numérica

Nível de dano	1%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Redução h (mm)	0.06	0.3	0.6	1.2	1.8	2.4	3	3.6
Novo valor h (mm)	5.94	5.7	5.4	4.8	4.2	3.6	3	2.4

3.1.2.1 EFEITO DA PRESENÇA DE DANO

Abaixo encontram-se representadas as variações nas frequências naturais provocadas pela presença do dano:

Tabela 3.3-Frequências Naturais para diferentes níveis de dano obtidos numericamente

Nível dano	Frequências (Hz)					
	1º modo	2º modo	3º modo	4º modo	5º modo	6º modo
Sem dano	31.89	87.90	172.26	284.61	424.91	593.04
1%	31.89	87.90	172.26	284.61	424.91	593.03
5%	31.89	87.89	172.25	284.58	424.90	592.98
10%	31.88	87.89	172.25	284.54	424.90	592.91
20%	31.87	87.86	172.23	284.41	424.90	592.68
30%	31.84	87.82	172.20	284.17	424.89	592.28
40%	31.78	87.75	172.15	283.74	424.88	591.54
50%	31.67	87.60	172.04	282.89	424.85	590.09
60%	31.42	87.27	171.79	281.02	424.79	586.90

Pela observação da Tabela 3.3, constata-se que o aumento do nível de dano tem maior influência nos modos de vibração mais altos. No entanto para o caso em estudo a banda de frequências considerada encontra-se entre os 0-400Hz pois os pontos de medição utilizados na simulação numérica (que tentam reproduzir a experimentação) não possuem a resolução espacial suficiente para a representação dos modos de vibração mais elevados com precisão.

Os modos de vibração foram obtidos através do cálculo dos vetores próprios. A Figura 3.3 representa os modos para a situação sem dano na gama de frequências em estudo (0-400 Hz), que inclui as primeiras quatro frequências naturais.

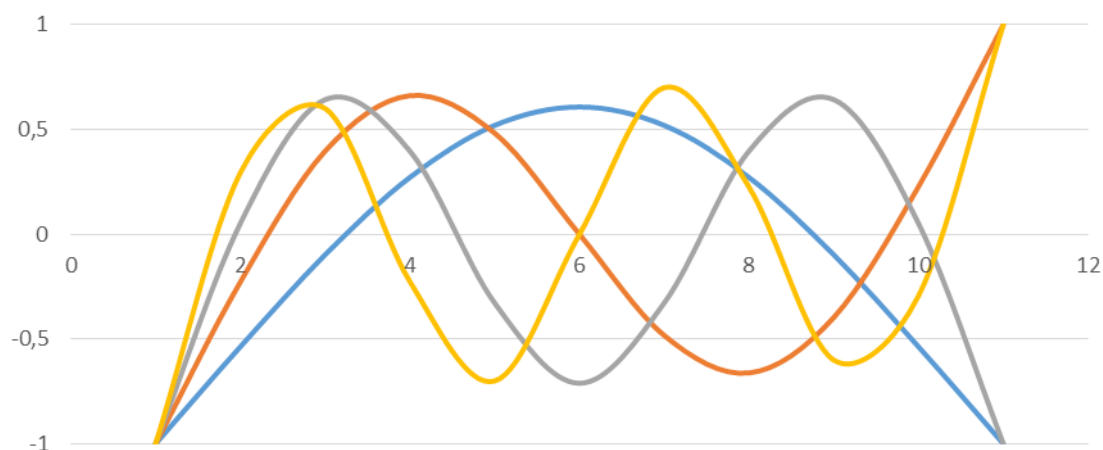


Figura 3.3-Primeiros quatro modos de vibração da estrutura sem dano

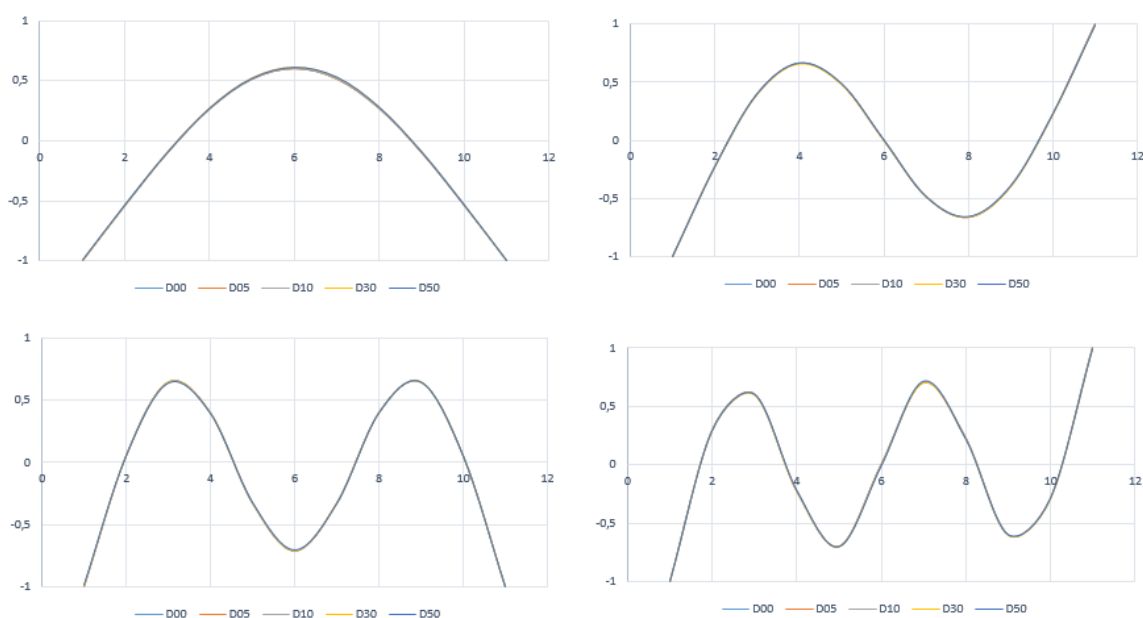


Figura 3.4-Modos de vibração para diversos níveis de dano

A Figura 3.4 mostra a variação dos modos de vibração para os diferentes estágios de dano, no entanto apesar da presença do dano não se registam alterações visuais. Como tal, foram analisados em pormenor cada um dos modos para o nível de dano de 50%, tendo-se verificado (Figura 3.5) que a alteração só é visível no quarto modo de vibração. É ainda de registar que os pontos onde a variação deste modo foi mais acentuada ocorreram nos pontos situados na vizinhança do ponto onde o dano está localizado.

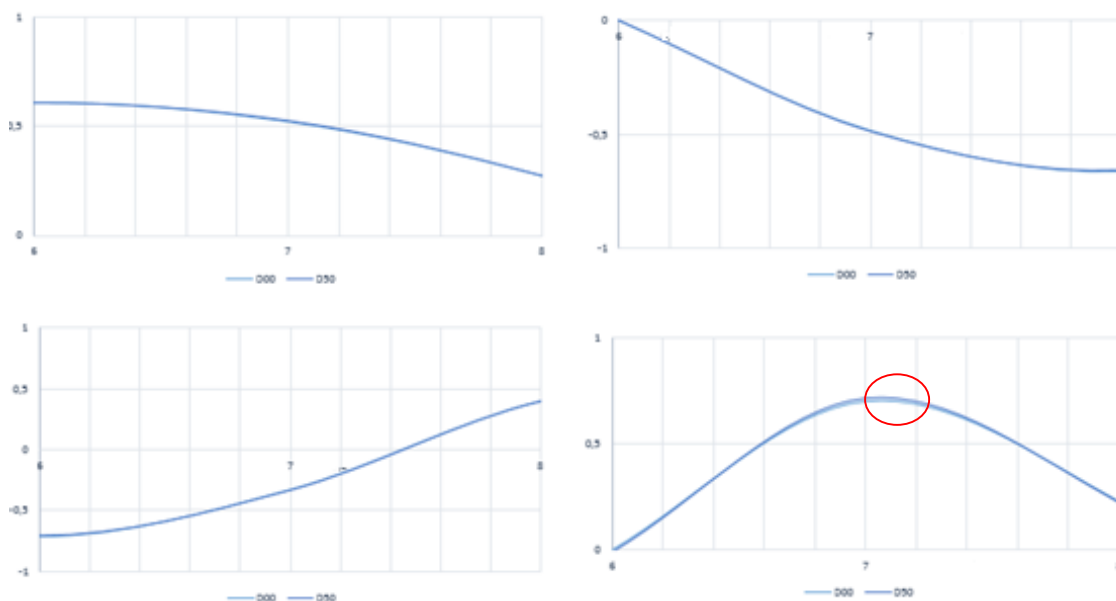


Figura 3.5-Variação dos modos de vibração em pormenor

3.1.3 IMPLEMENTAÇÃO DE RUÍDO

Um dos assuntos de grande complexidade é a quantificação do ruído presente nas medições realizadas, ruído este que prejudica a correta deteção e localização do dano. A presença de ruído nas FRFs medidas não pode ser associado a um único fator específico, possuindo diversas fontes (conhecidas e desconhecidas) que alteram os dados obtidos experimentalmente.

Um dos objetivos deste trabalho era a realização de uma análise do efeito que o ruído, presente nas FRFs, pode produzir na correta deteção e localização do dano. Como tal, e de modo a tornar comparável os dados obtidos no caso numérico com os obtidos numa situação experimental as medições obtidas foram poluídas com uma função de carácter aleatório (ruído branco), implementada uniformemente ao longo de toda a gama de frequências.

Trabalhos anteriormente realizados, por diversos autores, sugerem que a percentagem de ruído branco a adicionar aos dados numéricos não ser superior a 4-5%, pensando-se desta forma simular a situação experimental normalmente encontrada, assim sendo optou-se por considerar a adição de uma percentagem de ruído branco de 2%.

É de ressaltar, que cada uma das FRFs a utilizar nos vários indicadores estudados (considerada medida) foi obtida através da média aritmética de dez FRFs poluídas. Desta forma pretende-se simular o processo realizado experimentalmente, que tem como objetivo minimizar o efeito do ruído, onde é definido, *à priori*, o número de médias a realizar para cada medição efetuada.

3.2 DETEÇÃO DE DANO

3.2.1 MAC

Tal como apresentado em diversa literatura [7],[15],[25], o critério MAC é utilizado para a detecção de dano, na sua aplicação é verificada a existência da correlação entre os modos de vibração da estrutura danificada (i) e j):

$$MAC(\phi_i, \phi_j) = \frac{\left| \sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_i)_k^* \right|^2}{\left(\sum_{k=1}^n (\phi_j)_k (\phi_j)_k^* \right) \left(\sum_{k=1}^n (\phi_i)_k (\phi_i)_k^* \right)} \quad (3.2)$$

onde k diz respeito ao elemento do vetor do modo de vibração associado e $*$ representa o seu valor complexo conjugado.

Para o caso de estudo numérico em causa foi utilizada a média dos resultados obtidos para os quatro primeiros modos de vibração, para cada um dos níveis de dano considerados, de modo a realizar uma quantificação relativa. Na Figura 3.6 encontram-se representados os resultados obtidos, com a aplicação do critério MAC, para os vários níveis de dano considerados na ausência de ruído nos dados obtidos.

Tabela 3.4-Critério MAC para os diversos níveis de dano

Dano	1%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Modo	MAC							
1	1	1	1	1	0,999998	0,999994	0,999978	0,999905
2	1	1	1	0,999999	0,999997	0,999988	0,999953	0,999793
3	1	1	1	0,999999	0,999996	0,999986	0,999947	0,999766
4	1	1	1	0,999997	0,999990	0,999963	0,999863	0,999433
Média	1	1	1	0,999999	0,999995	0,999983	0,999935	0,999724

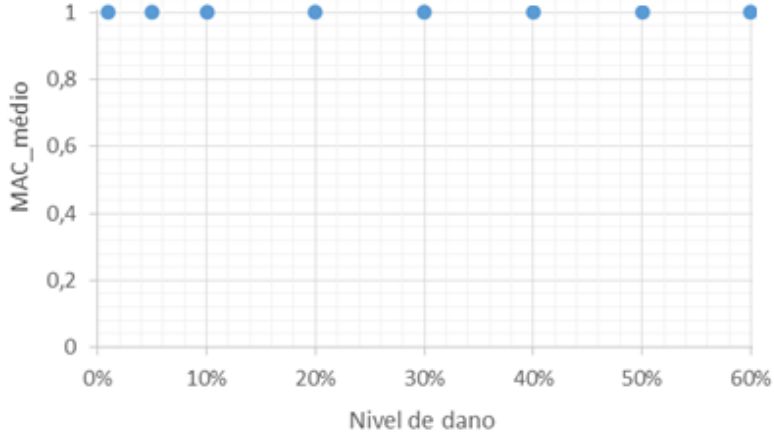


Figura 3.6-Aplicação do critério MAC para a situação sem ruído

Através da análise dos resultados obtidos pode constatar-se a variação do valor do MAC é bastante reduzida, mesmo para valores de dano consideráveis, sendo a variação máxima registada de $2,76 \cdot 10^{-4}$ para a situação de redução de espessura em 60%. Assim sendo verifica-se que o indicador não consegue oferecer uma deteção de dano eficaz para a situação apresentada.

Ainda em relação à Tabela 3.4 é possível verificar que, embora reduzida, a variação do critério MAC é superior para o caso do quarto modo de vibração, indicando que o dano é verificado numa fase mais precoce aquando a utilização de modos de vibração superiores.

3.2.2 DRQ e AIGAC

Tal como foi referenciado na revisão bibliográfica, a utilização da correlação entre FRFs para a deteção de dano é proposta por diversos autores. *Sampaio et al* [37] apresentou o indicador DRQ, apresentado na equação (3.3). Este calcula o valor médio de RVAC, ao longo da gama de frequências considerada.

$$DRQ = \frac{\sum_{\omega} \frac{\left| \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n H_{ij}^d(\omega) (H_{ij}^{d*}(\omega)) \right|^2}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n (H_{ij}(\omega) (H_{ij}^*(\omega))) \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n (H_{ij}^d(\omega) (H_{ij}^{d*}(\omega)))}}{N_{\omega}} \quad (3.3)$$

M e n representam, respetivamente, o número máximo de pontos de excitação e medição considerados e N_{ω} o número total de frequências estudadas. Para o caso em estudo foram

considerados 11 pontos de excitação (j) e medição (i) e número total de frequências estudadas de 3200.

Tal como *Sampaio et al* [38], *Zang et al* [40] também utiliza a correlação entre FRFs para a detecção de dano, através de AIGAC. A sua formulação é apresentada como o valor médio ao longo da gama de frequências, N_ω , e a sua aplicação é referente à força j (em M posições) quando localizada nos 11 pontos de medição apresentados na Figura 3.1.

$$AIGAC = \frac{\sum_{\omega} \frac{2 \cdot \left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M (H_{i,j}^*(\omega) H_{i,j}^{dano}(\omega)) \right|}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M (H_{i,j}^*(\omega) H_{i,j}(\omega)) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M ((H_{i,j}^{dano}(\omega))^* H_{i,j}^{dano}(\omega))}}{N_\omega} \quad (3.4)$$

$H_{i,j}(\omega)$ representa o valor de H da estrutura sem dano, no ponto de medição i , para uma dada força aplicada j , a uma dada frequência, e $H_i^{dano}(\omega)$ o mesmo mas agora para a estrutura com dano, o número total de pontos de medição é n e índice $*$ representa o complexo conjugado.

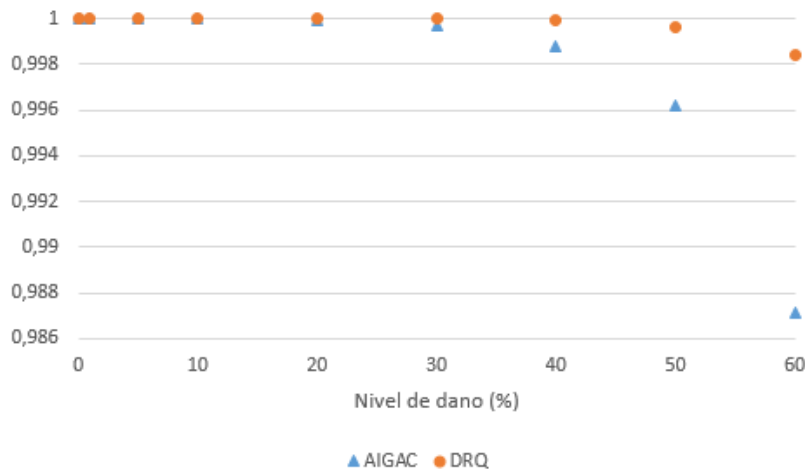


Figura 3.7- Resultados obtidos através do indicador AIGAC e DRQ para situação numérica sem ruído

Pode verificar-se através da observação da Figura 3.7 que a variação dos indicadores para os diversos valores de dano considerados é pouco significativa na gama de leitura adotada (0.986-1). A detecção de dano para os níveis mais precoces é praticamente inexistente, apenas a partir de 30% de redução da rigidez se começa a verificar alguma oscilação. Relativamente ao

comportamento do indicador AIGAC, este apresenta-se com variações superiores nos estágios de dano mais elevados comparativamente ao observado com a aplicação do indicador DRQ.

Com o intuito de verificar o efeito da presença de ruído nos dados obtidos na simulação numérica procedeu-se à poluição destes, com uma função de erro aleatória com uma percentagem de ruído branco até 2%, o comportamento dos métodos em estudo é o apresentado na Figura 3.8.

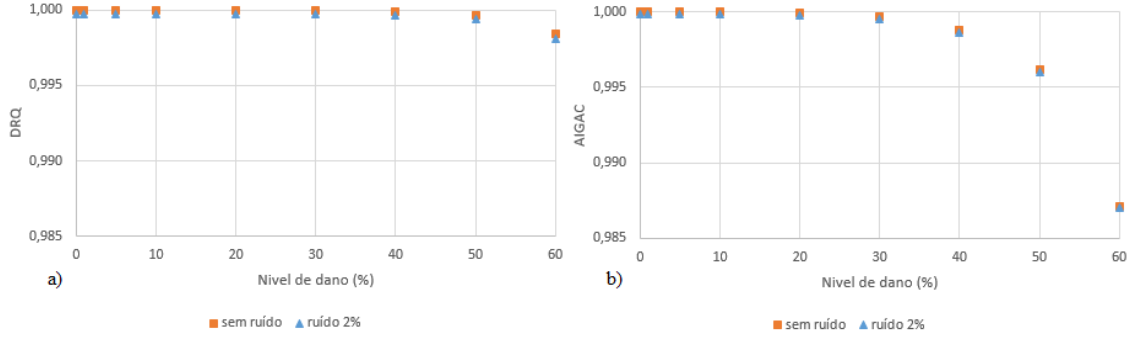


Figura 3.8- Influência do ruído nos resultados obtidos para os indicadores (a) DRQ (b) AIGAC

Pela análise da Figura 3.8 (a), pode verificar-se que o indicador DRQ, quando sujeito ao efeito do ruído branco, não apresenta variações consideráveis. No caso da aplicação do indicador AIGAC verificou-se que este também é pouco sensível à presença de ruído nas FRFs, não tendo sido registadas alterações significativas nos valores obtidos na presença ou ausência de ruído, Figura 3.9 (b).

3.2.3 TDI e WDI

Através da correlação das transmissibilidades, τ_{rs} , obtida pelo MRVAC (já apresentado na secção 2.3.5) o TDI [39] estuda a variação das mesmas com a presença do dano através de:

$$TDI = \frac{1}{N_{\omega}} \sum_{\omega} \frac{\left| \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M {}^d \tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{\tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right|^2}{\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left[{}^d \tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{{}^d \tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right] \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{j=1}^M \left[\tau_{rs}^{(j)}(\omega) \overline{\tau_{rs}^{(j)}(\omega)} \right]}, s = r + 1 \quad (3.5)$$

onde o índice * é referente ao complexo conjugado, j diz respeito à posição da força de excitação (em M posições) e r e s representam as coordenadas de medição. O seu cálculo é realizado ao longo de toda a gama de frequências em estudo (N_{ω}).

O seu valor pode variar entre 0 e 1 sendo que a proximidade de 0 indica a presença de elevado dano. De seguida encontram-se representados os resultados obtidos para a aplicação do indicador TDI para o caso de estudo numérico, na ausência de ruído:

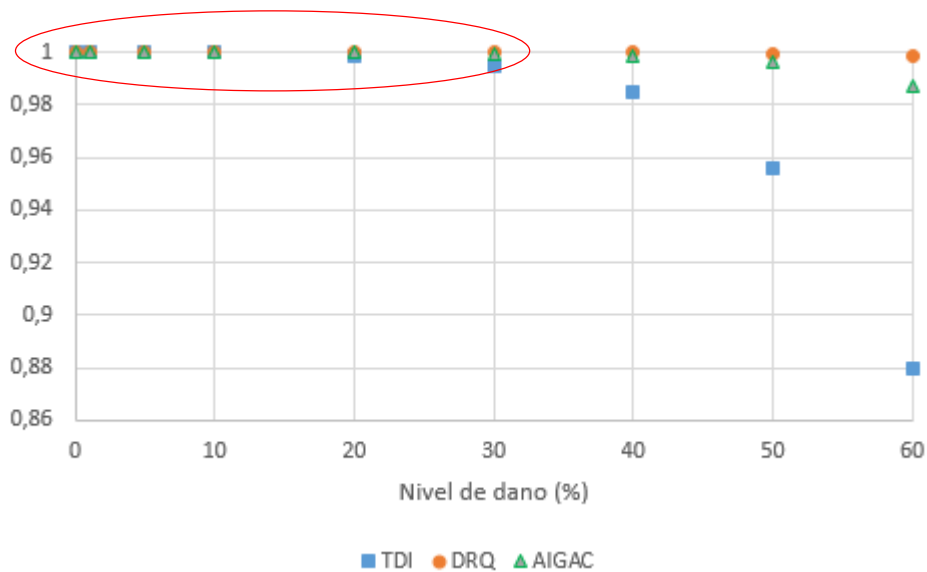


Figura 3.9- Resultados obtidos com o indicador TDI comparativamente a DRQ e AIGAC para 7 níveis de dano

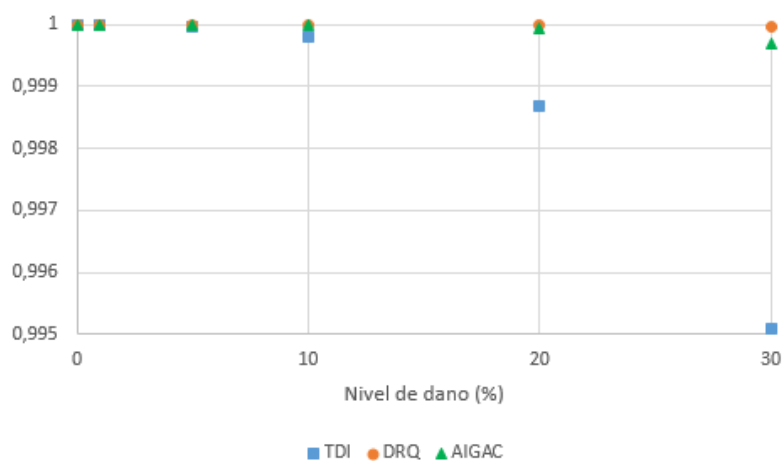


Figura 3.10- Análise de pormenor dos resultados obtidos com o indicador TDI comparativamente ao indicador DRQ e AIGAC

A partir da Figura 3.9 é possível verificar que a eficiência do indicador TDI apresenta uma variação superior para níveis de dano mais precoces. Com uma análise de pormenor (Figura 3.10) é verificado que o mesmo consegue detetar o dano a partir do nível de dano de 10%.

Na próxima figura (Figura 3.11) são apresentados os valores obtidos com a aplicação do indicador MRVAC ao longo da gama de frequências 0-400Hz, para quatro dos níveis de dano estudados.

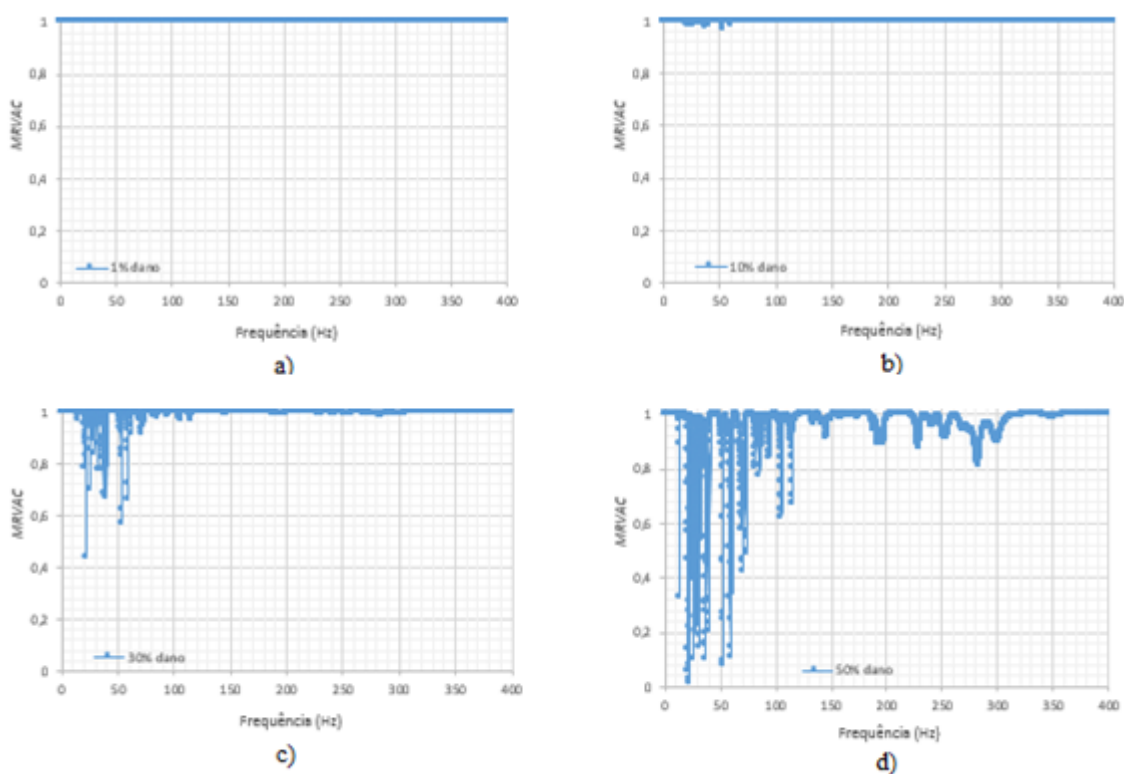


Figura 3.11-Variação do indicador MRVAC para diversos níveis de dano (a) 1% (b) 10% (c) 30% (d) 50%

Através da análise destes resultados é possível verificar que para pequenos níveis de dano a correlação verificada entre as transmissibilidades obtidas para a estrutura sã e danificada é bastante alta, obtendo-se desta forma valores de MRVAC muito próximos de 1. É também de notar que as variações superiores se encontram a frequências mais baixas (entre 0-100Hz). Tal como já referido na revisão bibliográfica, o indicador TDI é obtido através do cálculo do valor médio do indicador MRVAC, no conjunto de pontos de medição e excitação considerados, para a gama de frequências considerada de estudo, no entanto como se pode verificar na Figura 3.11, para pequenos níveis de dano, o número de frequências registadas em que o indicador MRVAC apresenta valores baixos é muito reduzida o que vai levar a que quando calculado o valor de TDI o efeito da média torne impercetível a sua existência.

Este facto pode ser ultrapassado, com o indicador WDI [48] que tem em consideração, não somente os valores de MRVAC, ao longo da frequência em estudo, mas também o número de vezes que estes resultados ocorrem. Tendo este facto em consideração, os valores de MRVAC serão classificados em intervalos de 0.1¹ (valores de MRVAC entre 1 e 0.9, 0.9 e 0.8, ..., 0.1 e 0, resultando 10 intervalos).

¹ Podia ter sido considerado outro intervalo

A formulação completa deste indicador é explicitado em [48], no entanto para os 10 intervalos indicados e com a contribuição do critério MRVAC ao longo do gama de frequências o indicador WDI é traduzido por:

$$WDI = \sum_{i=1}^{10} \left(n_i \cdot \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_i} MRVAC \right)_i^m}{N^{m+1}} \right) \quad (3.6)$$

onde n_i representa o número de vezes que o valor de MRVAC se encontra no intervalo correspondente e N o número total de frequências em estudo

Na Figura 3.12 encontram-se representados os valores obtidos para os vários níveis de dano estudados, com a aplicação do indicador TDI e WDI aos dados obtidos (na ausência de ruído), considerando para o último diferentes valores de m .

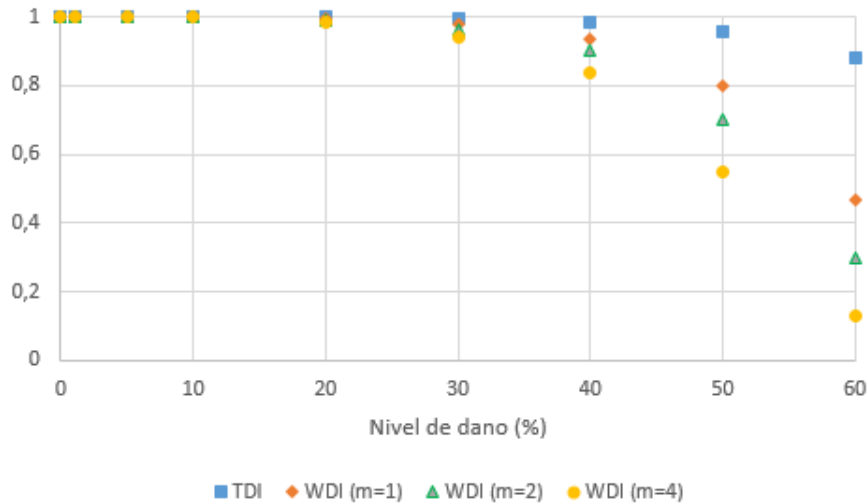


Figura 3.12- Aplicação do critério TDI e WDI com diferentes expoentes m e para 8 níveis de dano

A Figura 3.12 mostra que a aplicação do critério WDI melhora a capacidade de detecção precoce do dano, sendo mais acentuada para maiores valores de m .

De modo a estudar o comportamento do indicador WDI perante uma situação mais realista, os dados obtidos numericamente foram sujeitos à influência do ruído branco para uma percentagem que pode ir até 2%. Com o ruído aplicado é estudada a influência do mesmo na distribuição do MRVAC:

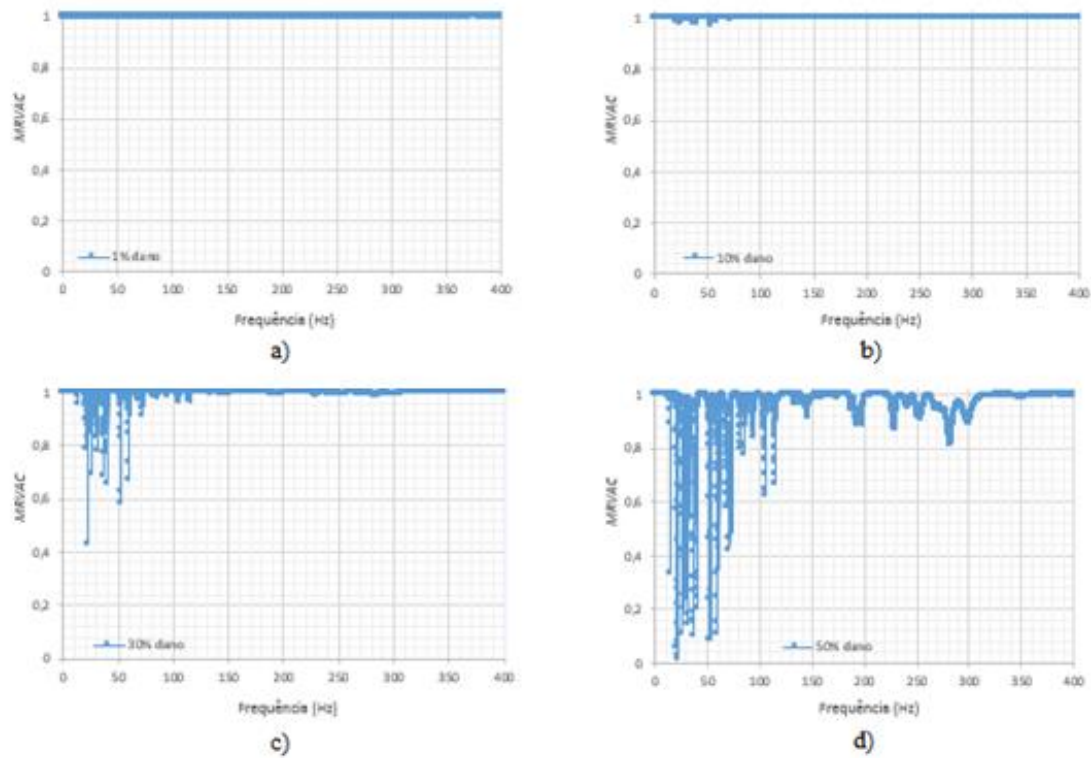


Figura 3.13-Distribuição de MRVAC sujeito a ruído branco para nível de dano (a) 1% (b) 10% (c) 30% (d) 50%

Os resultados apresentados na Figura 3.13 revelam que a adição de ruído não alterou significativamente os dados obtidos pelo indicador MRVAC a cada uma das frequências estudadas. Assim sendo, constatou-se que os valores obtidos com os indicadores TDI e WDI, para os vários níveis de dano considerados, para a situação de dados com e sem ruído, são praticamente iguais, como se pode verificar pelas Figura 3.14.

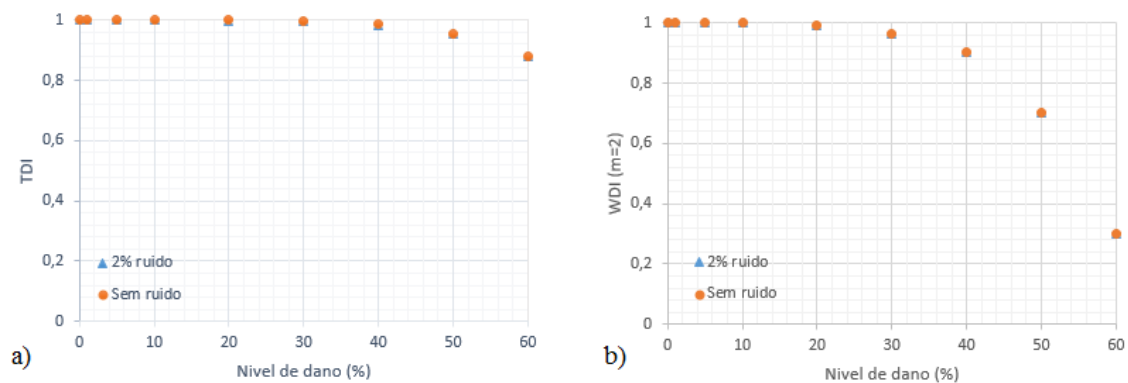


Figura 3.14-Influência do ruído no indicador (a) TDI e (b) WDI

Os resultados representados na Figura 3.14 conseguem demonstrar que os indicadores TDI e WDI são pouco sensíveis à presença de ruído, nas transmissibilidades utilizadas.

Ainda em relação ao indicador WDI, este revelou melhor capacidade de detetar níveis de dano precoces que o indicador TDI. A utilização do expoente m na formulação de WDI, melhorou ainda mais a capacidade de deteção precoce do dano. A escolha do valor para o expoente encontra-se diretamente relacionado com o efeito que o dano pode ter na estrutura em estudo, sendo especialmente importante para estruturas críticas em que dano deve ser detetado o mais precocemente possível. Em conclusão, para uma estrutura complexa, podem ser estudados em avanço (na estrutura intacta) cenários específicos de dano, de modo a encontrar a melhor formulação, ou seja, o expoente m mais apropriado. Para a ilustração deste facto foi realizado um teste no caso em estudo, em que é utilizado um expoente de 200. O seu resultado é representado na Figura 3.15, em que a variação do indicador, e consequentemente a deteção de dano, é adquirida logo no primeiro estágio de dano (redução de espessura em 1%).

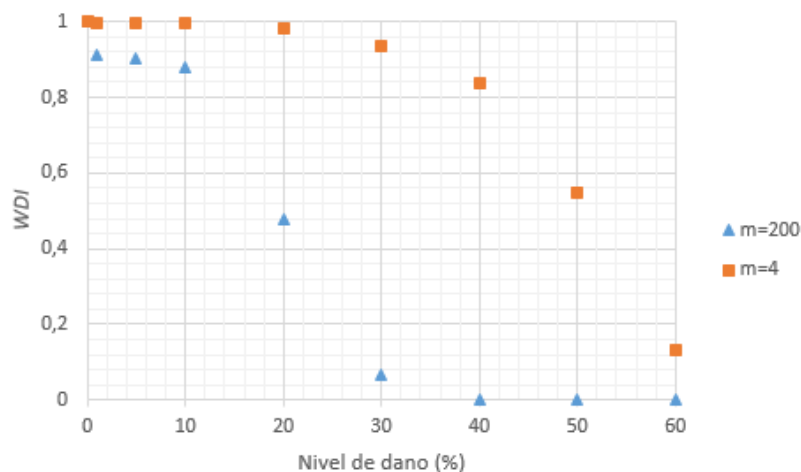


Figura 3.15-Efeito do expoente m no indicador WDI

3.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DETEÇÃO

Os resultados obtidos para os vários indicadores que utilizam FRFs e transmissibilidades de movimento para deteção de dano quando sujeitos à poluição de ruído branco encontram-se representados na Figura 3.16.

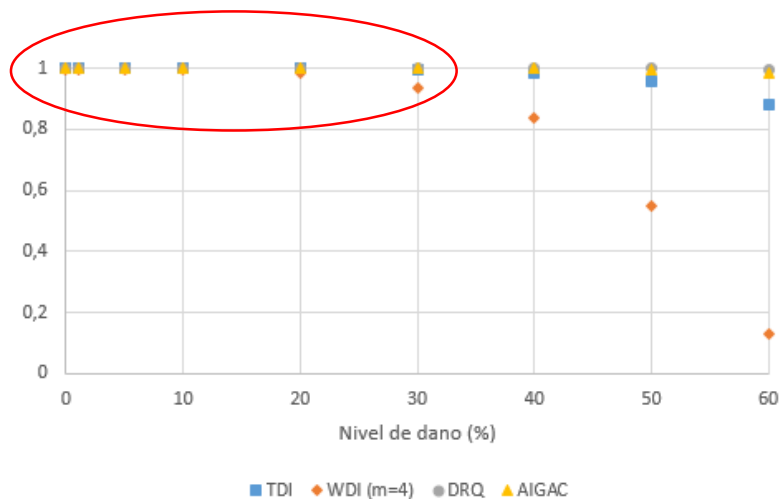


Figura 3.16-Métodos de deteção de dano com aplicação de ruído branco de 2%

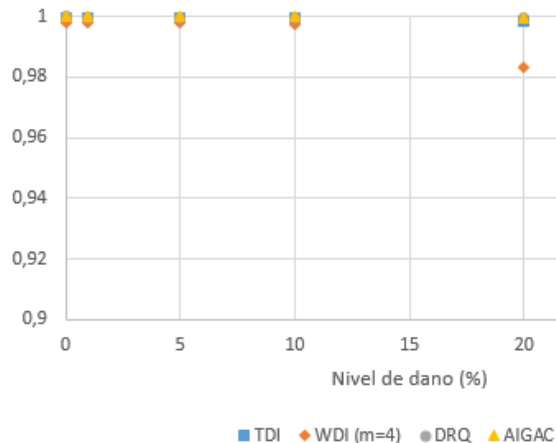


Figura 3.17- Análise em pormenor da comparação entre métodos de deteção de dano

Com a análise da Figura 3.16 e Figura 3.17 é verificado que o WDI possui os melhores resultados, detetando o dano a partir do nível de dano de 20%. Para a situação numérica em estudo o indicador TDI consegue detetar a presença do dano, a partir do nível onde ocorre 30% de redução de espessura, no caso dos critérios DRQ e AIGAC a variação não é suficientemente substancial para a deteção de dano eficaz (para as escalas de visualização adotadas).

3.3 LOCALIZAÇÃO DE DANO

3.3.1 COMAC

A partir do Indicador COMAC [14], (também apresentado na secção 2.3.2.1) é calculado, para cada uma das i coordenadas em estudo, o valor da correlação entre os n modos de vibração da estrutura sã (A) e danificada (B), o indicador varia entre 0 e 1, a coordenada que apresentar o valor mínimo do indicador indicará a localização do dano.

$$COMAC_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^n |(\phi_A)_{ij} (\phi_B^*)_{ij}| \right)^2}{\sum_{j=1}^n |(\phi_A)_{ij}|^2 \sum_{j=1}^n |(\phi_B)_{ij}|^2} \quad (3.7)$$

Tal como na situação de detecção do dano, também agora o método será testado na situação ideal que corresponde à ausência de ruído. Na implementação desta metodologia foram utilizados os primeiros quatro modos de vibração. Os resultados obtidos com a aplicação deste indicador, para quatro dos oito níveis de dano referidos na tabela 3.4 encontram-se representados na Figura 3.18:

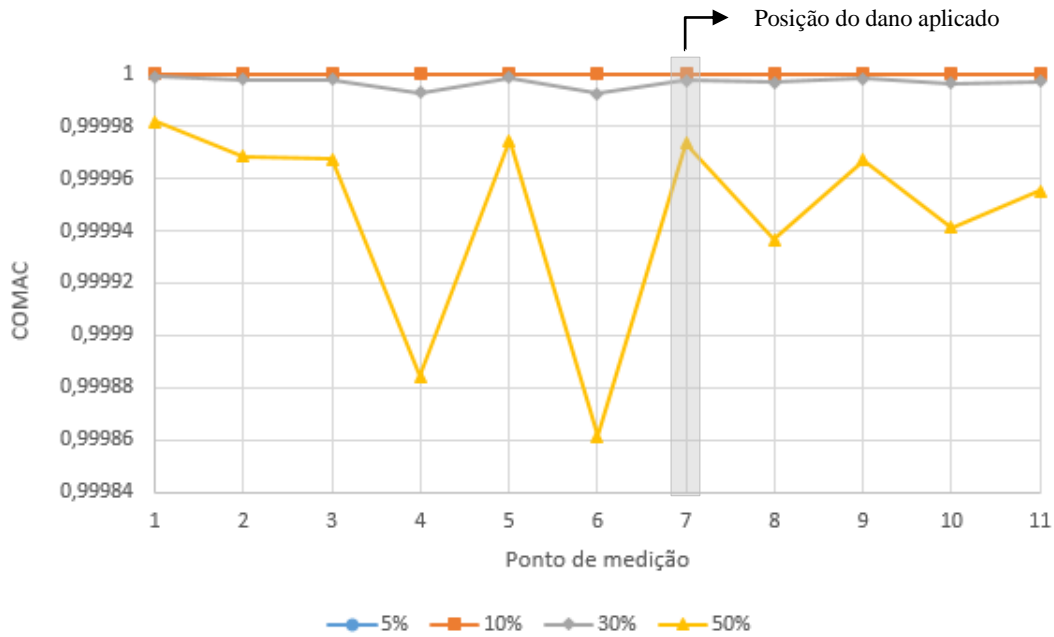


Figura 3.18-Indicador COMAC para diversos níveis de dano

Como pode ser observado através da figura anterior, os valores obtidos pelo indicador para os diversos níveis de dano não apresentam uma variação significativa, não conseguindo portanto oferecer uma localização fiável do dano.

3.3.2 MODIFIED MODE SHAPES DIFERENCE (MMSD)

Para a realização dos testes relativos à aplicação das diferenças normalizadas entre os modos de vibração foram utilizados apenas os primeiros quatro modos de vibração.

Tal como formulado em [19] os modos de vibração referentes à estrutura sã e danificada são normalizados em relação ao máximo absoluto de cada modo de vibração (representado na equação (3.8) como $(\phi_{i,j})_{norm}$). Após esta normalização é então calculada, para cada ponto de medição, a diferença dos valores do modo normalizado da estrutura sã e danificada.

$$\Delta\lambda_i = (\phi_{i,j})_{norm} - (\phi_{i,j}^d)_{norm} \quad (3.8)$$

onde o índice d diz respeito à estrutura danificada, i representa a coordenada de medição e j é referente ao modo de vibração em estudo.

Posteriormente Elshafey et al [19] considera a normalização de $\Delta\lambda_i$ perante o seu máximo absoluto a cada modo de vibração, formulando então o indicador MMSD:

$$MMSD_i = \frac{|\Delta\lambda_i|}{\max|\Delta\lambda_i|} \quad (3.9)$$

O indicador varia entre 0 e 1, sendo que os valores próximos de 1 identificam os pontos onde o dano se localiza.

A Figura 3.19 representa o indicador MMSD normalizado quando a estrutura é sujeita a um dano de 5% (Tabela 3.2) nos primeiros quatro modos de vibração:

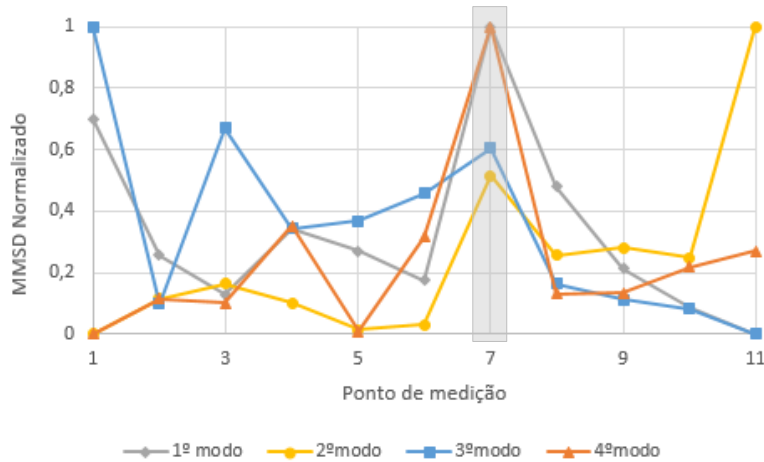


Figura 3.19-Aplicação do MMSD para os primeiros quatro modos de vibração

Apesar de se verificar o aparecimento de um aumento do valor do indicador no ponto onde o dano se localiza (ponto 7) para os vários modos em estudo, a certeza inequívoca de que o dano se encontra efetivamente nesse ponto não é clara. Assim sendo, é proposto neste trabalho a realização do cálculo do somatório dos valores obtidos em cada ponto de medição, i , tentando-se desta forma clarificar os resultados, ou seja:

$$SUM_MMSD_i = \sum_{j=1}^n MMSD_i \quad (3.10)$$

em que j é referente ao modo de vibração e n ao número de modos considerados

Posteriormente os resultados obtidos são normalizados e apresentados na Figura 3.20, em que é verificado que a utilização do SUM_MMSD melhorou a capacidade de localização do dano.

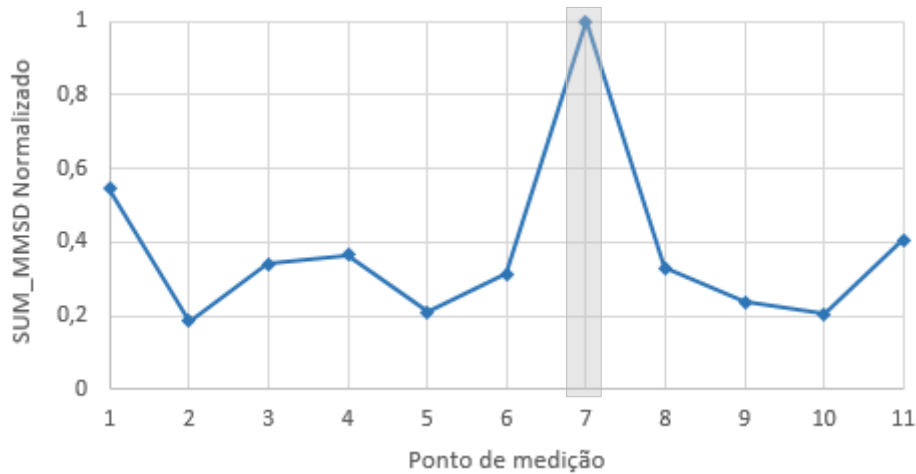


Figura 3.20- Efeito do somatório dos resultados obtidos em cada modo de vibração no indicador MMSD

3.3.3 FRF SHAPED CURVATURE (FRF_SC)

Tal como descrito na revisão bibliográfica a aplicação do indicador FRF_SC foi primeiramente proposta por *Maia et al* [43], este utiliza o valor complexo das receptâncias na sua implementação (secção 2.3.4.3). Neste trabalho para além da utilização do valor complexo das receptâncias obtidas numericamente, irá ser realizado um estudo onde se pretende verificar o efeito das diferentes componentes da receptância (parte real e imaginária) nos resultados obtidos.

Os testes foram realizados considerando a gama de frequências de 0-400 Hz aquando a aplicação da excitação em três casos. Na primeira situação, a excitação é aplicada num local situado antes do dano (ponto 3), na segunda situação, a excitação é aplicada no ponto onde o dano foi aplicado (ponto 7) e finalmente na terceira e última situação estudada, onde a excitação foi

aplicada num local posterior à localização do dano (ponto 9). Os resultados obtidos para a situação de um dano aplicado de 10% e sem ruído envolvido encontram-se expostos na Figura 3.21.

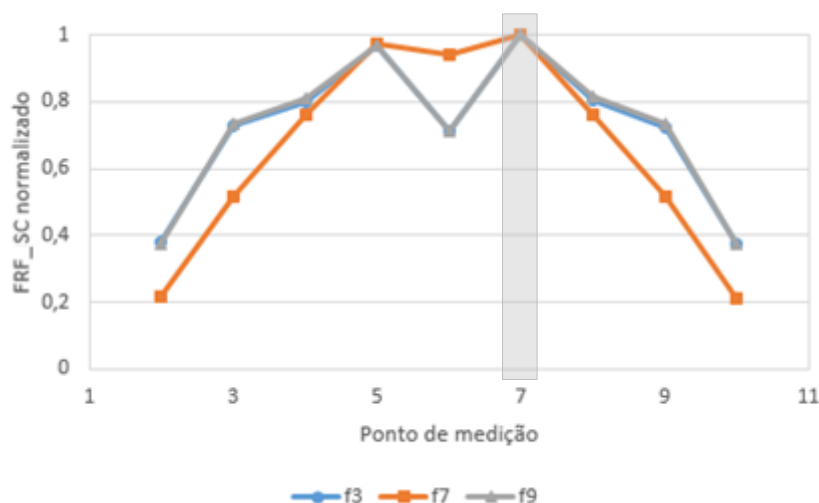


Figura 3.21-Indicador FRF_SC para a gama de 0-400 Hz

Com a análise da Figura 3.21 é possível verificar que o indicador não consegue fornecer uma localização do dano coerente. Na implementação do método as diferenças entre as curvaturas da estrutura sã e danificada são realizadas a cada frequência e posteriormente adicionadas ao longo de toda a gama de interesse. *Sampaio et al* [56] propõe apenas verificar as diferenças máximas a cada frequência e posteriormente contabilizar as diferenças máximas para cada ponto de medição de forma a localizar o dano.

Por outras palavras, a estratégia utilizada remete à normalização das diferenças entre curvaturas a cada frequência, sendo então que a diferença máxima é apresentada como 1 e denominado por ocorrência, posteriormente é realizado para cada ponto de medição a contagem das mesmas, tendo sido obtido para a situação anteriormente referenciada os seguintes resultados:

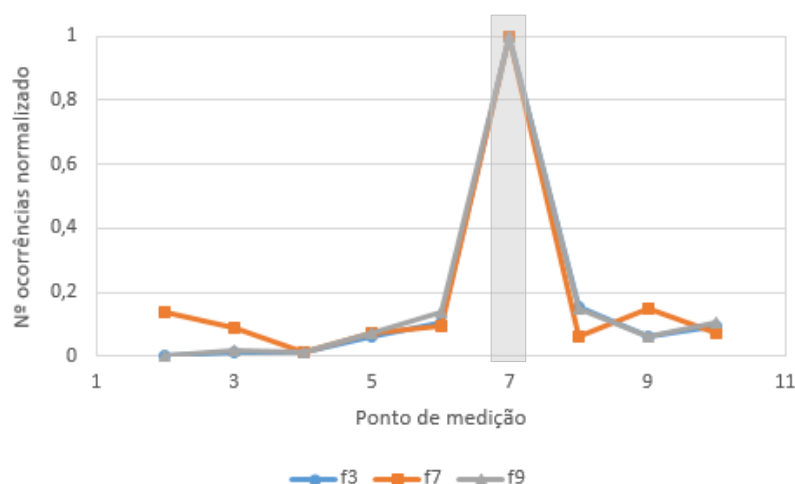


Figura 3.22-Resultados obtidos com o sistema de contagem de ocorrências no indicador FRF_SC

Com a análise da Figura 3.22 é possível verificar que a implementação da contagem do número de ocorrências no FRF_SC consegue melhorar os resultados obtidos. O elevado número de ocorrências envolvido no ponto de medição 7 fornece uma localização clara do dano, independentemente da localização da força aplicada.

3.3.3.1 APLICAÇÃO DE RUÍDO

Os dados obtidos numericamente são nesta etapa sujeitos a aplicação de ruído branco até 2%. A Figura 3.23 mostra os resultados obtidos para a situação acima referida, sendo verificado que a localização do dano não é perceptível. Este comportamento ocorre devido à acumulação de erro produzido pela implementação de ruído [73]. O ruído foi aplicado as receptâncias obtidas pelo programa de uma forma aleatória, o seu efeito aquando do cálculo das curvaturas (2º derivada) provoca uma mudança drástica nos resultados obtidos quer com a aplicação do FRF_SC (comparar Figura 3.21 e Figura 3.23 (a)) quer com a aplicação da contagem do número de ocorrências (comparar Figura 3.22 e Figura 3.23 (b)), tornando claro a elevada sensibilidade desta metodologia à presença de ruído nas FRFs.

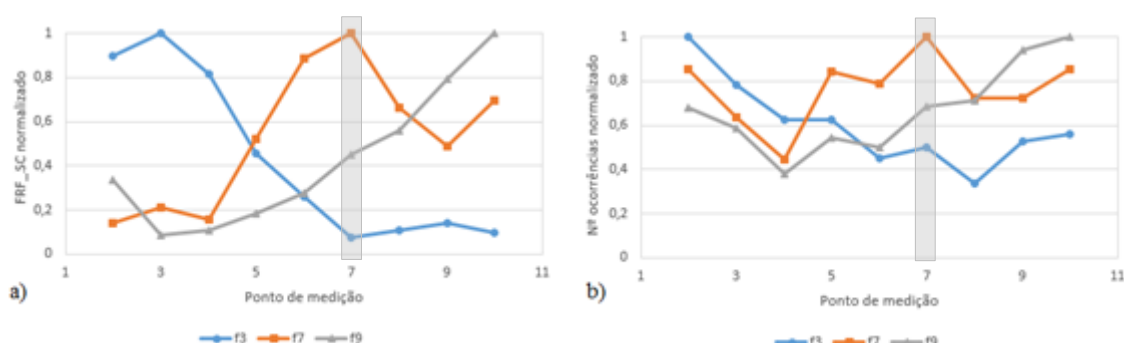


Figura 3.23-Implementação do indicador FRF_SC (a) diferenças (b) ocorrências sujeito ao ruído branco de 2%

3.3.3.2 APLICAÇÃO DE INTERVALOS DE FREQUÊNCIA

De modo a minimizar os efeitos do ruído presente nos dados utilizados é formulado neste trabalho uma nova metodologia definida por intervalos de frequência. Esta abordagem consiste em dividir a gama de frequências da FRF em n intervalos. Em cada um dos intervalos é calculado o valor médio da FRF, restando assim um FRF com n valores conhecidos. Se procedermos identicamente para todas as FRFs obtidas para a mesma força aplicada, é obtido n MOVs médios que serão então utilizados para o cálculo do indicador FRF_SC. Posteriormente é aplicada a técnica da contagem das ocorrências.

De forma a elucidar o efeito que este procedimento tem nas FRFs são apresentados na Figura 3.24 os dois casos considerados. Na situação inicial, os MOVs foram obtidos para a frequência de estudo considerada, entre 0 e 400Hz, com uma resolução de 0.125 Hz (3200 linhas). No primeiro caso considerado procedeu-se à divisão da gama de frequências em estudo em 400 intervalos, sendo portanto calculada a média de cada 8 linhas de frequência (resultando em intervalos de 1 Hz) em cada uma das FRFs consideradas, obtendo-se no final 400 MOV's médios. No segundo caso procedeu-se à divisão da gama de frequências em 100 intervalos, sendo portanto calculada a média de cada 32 linhas de frequência (resultando em intervalos de 4 Hz) em cada uma das FRFs consideradas, obtendo-se no final 100 MOV's médios. A FRF obtida para o ponto de medição 1 com a aplicação da força no ponto 3 encontra-se exposta na Figura 3.24, quer para a situação original quer para os dois casos atrás referidos.

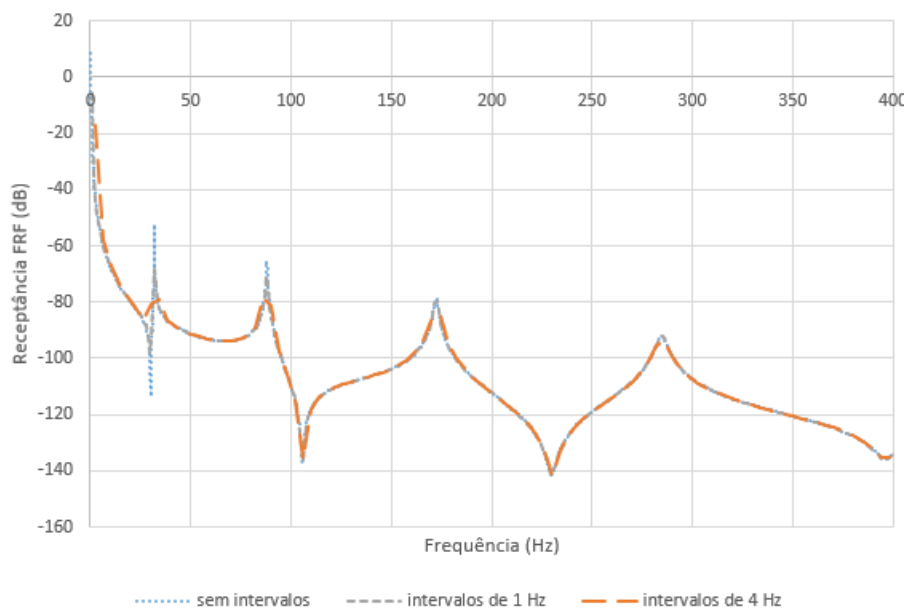


Figura 3.24- Efeito no número de intervalos na FRF

Pode verificar-se pela Figura 3.24 que a utilização de intervalos de frequência apresenta características semelhantes à presença de amortecimento, no entanto a redução na amplitude da FRF nas frequências naturais é superior nos primeiros modos de vibração. Na Figura 3.25 encontra-se apresentado um gráfico de pormenor, que pretende elucidar o efeito que a aplicação desta técnica teve no primeiro modo de vibração.

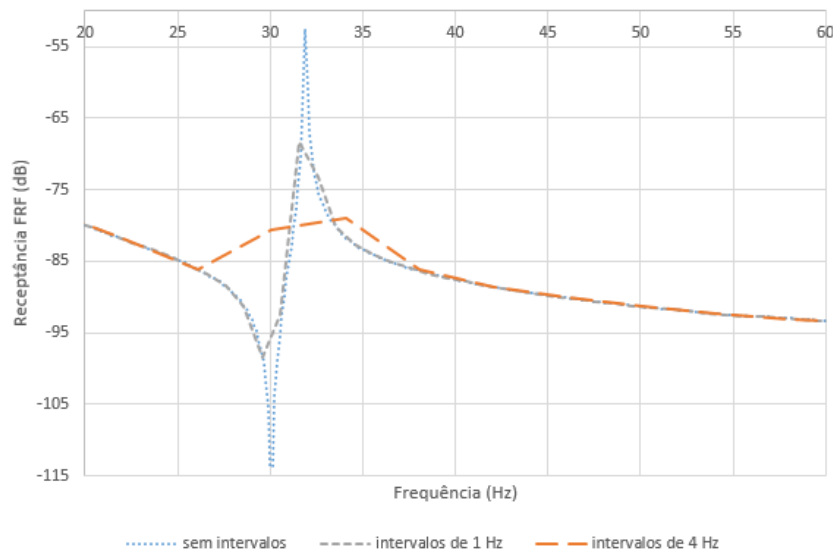


Figura 3.25- Efeito do número de intervalos no primeiro modo de vibração

Na Figura 3.26 encontram-se apresentados os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia para os dois casos de estudo atrás referidos, quando são aplicadas à estrutura a força em 3, 7 e 9, para um nível de dano de 10%, na presença de dados poluídos (2% de ruído branco).

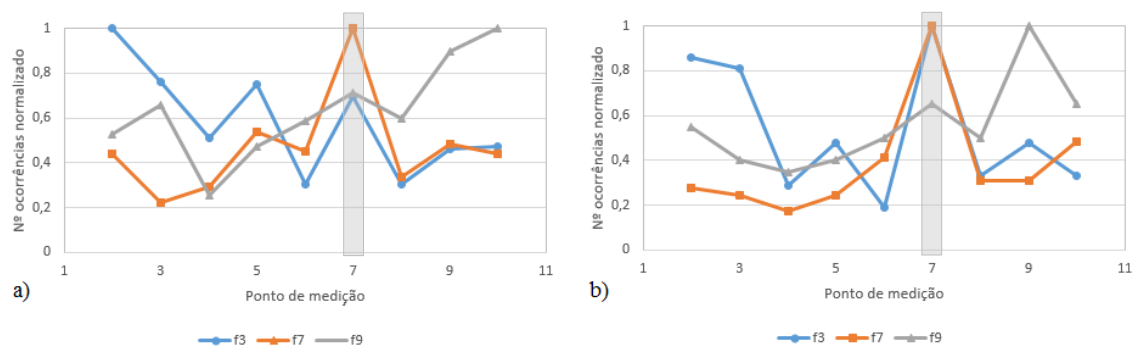


Figura 3.26-Aplicação dos intervalos de frequência no indicador FRF_SC (a) de 1 Hz (b) de 4 Hz

Comparando os resultados obtidos com a aplicação da metodologia dos intervalos de frequência (Figura 3.26) com os obtidos originalmente, sem a aplicação desta metodologia (Figura 3.23 (b)) pode verificar-se uma melhoria significativa nos resultados obtidos, em especial quando são aplicadas as forças 3 e 7. Pode ainda verificar-se que a localização do dano quando estamos na presença de dados poluído é fortemente afetada com a localização do ponto de aplicação da força, tal facto pode ser constatado através dos resultados obtidos com a aplicação da força no ponto 9.

Os resultados mais satisfatórios ocorrem aquando a utilização de 100 intervalos perante a excitação no ponto de medição 7 (ponto onde o dano foi aplicado).

3.3.3.3 UTILIZAÇÃO INDIVIDUAL DA PARTE REAL E IMAGINÁRIA DAS RECEPTÂNCIAS

Nesta secção é estudado o efeito da utilização somente da parte imaginária ou real das receptâncias na aplicação do indicador FRF_SC e a contagem das ocorrências associadas. Em primeira fase é apresentado os resultados com as diferentes componentes da receptância na ausência de ruído, encontrando-se os resultados expostos na Figura 3.27 para o estágio de dano de 10% perante a aplicação da força em 3, ou 7 ou 9.

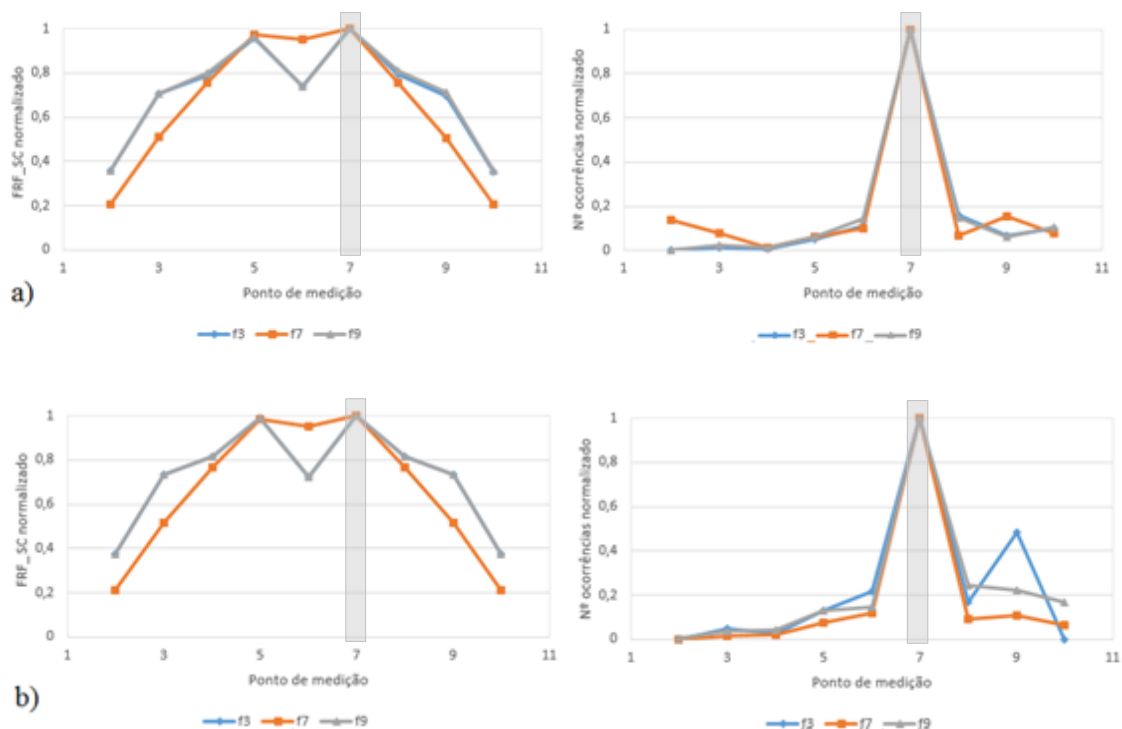


Figura 3.27-Aplicação do indicador FRF_SC e a utilização de ocorrências (a) parte real (b) parte imaginária

Os resultados obtidos com a utilização somente da parte real e imaginária das receptâncias não são muito divergentes. É de notar, no entanto, que na situação onde a força é aplicada em 3 surge um pico secundário no ponto 9 aquando a utilização da parte imaginária no gráfico correspondente à contagem do número de ocorrências (Figura 3.27).

De seguida são apresentados os resultados obtidos para o indicador FRF_SC e utilizando a contagem do nº máximo de ocorrências, para cada uma das componentes da receptância (real e imaginária) quando são utilizados dados poluídos com um ruído até 2%. Os resultados obtidos na Figura 3.28 correspondem à situação de redução de 10% na espessura da viga em estudo.

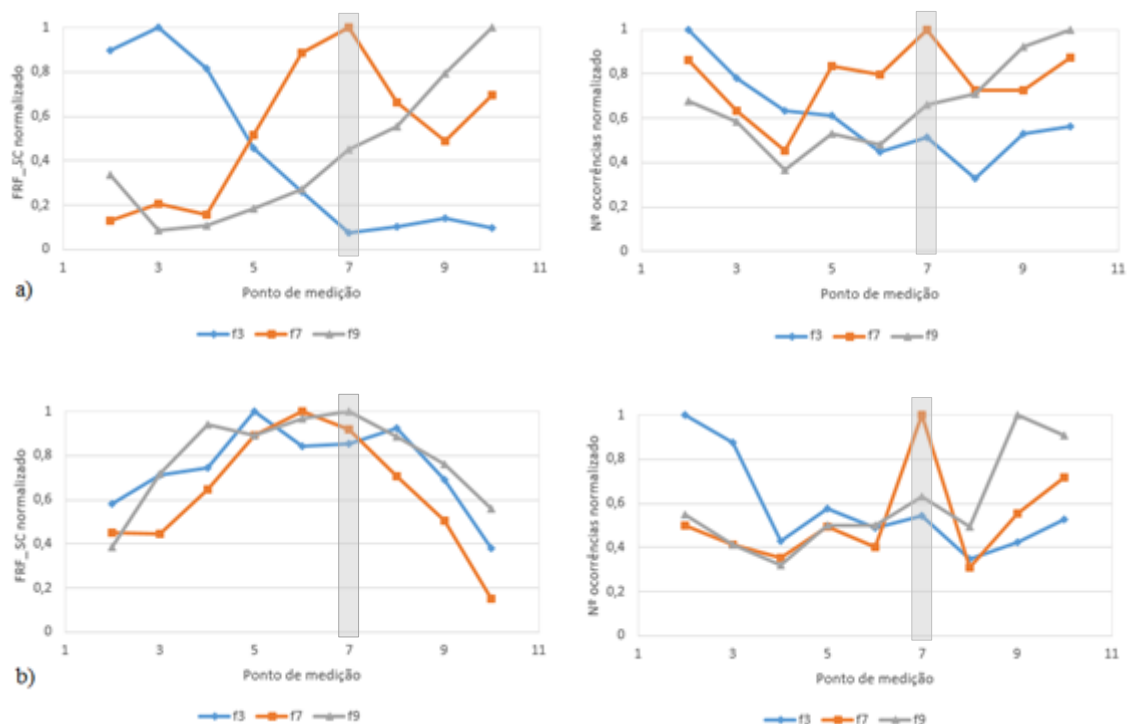


Figura 3.28- Influência do ruído no indicador FRF_SC e ocorrências (a) Parte Real (b) Parte imaginária

Pela análise da Figura 3.28 é verificado que os resultados obtidos quer para a parte real quer para a parte imaginária da receptância sofrem com a presença de ruído nos dados, no entanto é observado na Figura 3.28 b) que a parte imaginária consegue oferecer a localização do dano aquando a aplicação da força em 7 e a implementação da contagem do número de ocorrências. No caso da utilização da parte real no indicador, este não identifica a localização do dano, para nenhuma das forças aplicadas consideradas. Tal como realizado aquando a utilização das receptâncias no seu valor complexo, é agora apresentado os resultados da implementação de 100 intervalos de frequência de 4 Hz (Figura 3.29 e 3.31).

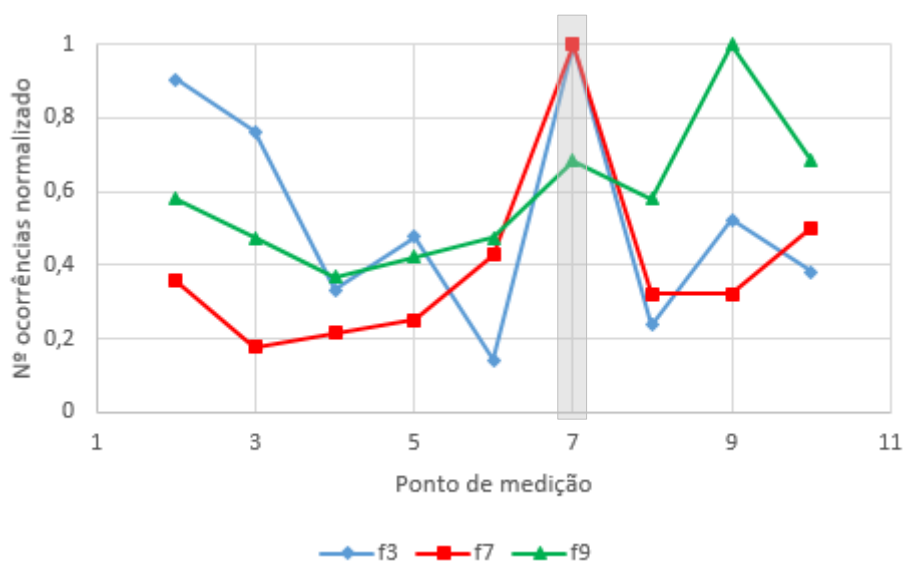


Figura 3.29- Influência dos intervalos de frequência no indicador FRF_SC (parte real)

Através da análise dos resultados expostos na Figura 3.29 conclui-se que a posição onde a excitação é aplicada tem influência no sucesso do método das curvaturas perante a situação com ruído, se a aplicação da força ocorrer antes do dano existe uma elevação antes do pico que representa o dano, no entanto se a excitação for realizada no ponto onde se encontra o dano, a determinação do mesmo é evidenciada. Em relação à aplicação da força após o dano (em 9), este prejudica o sucesso do método não conseguindo oferecer a correta localização do dano. De seguida é apresentado a influência da força aplicada mas agora utilizando somente a parte imaginária das receptâncias.

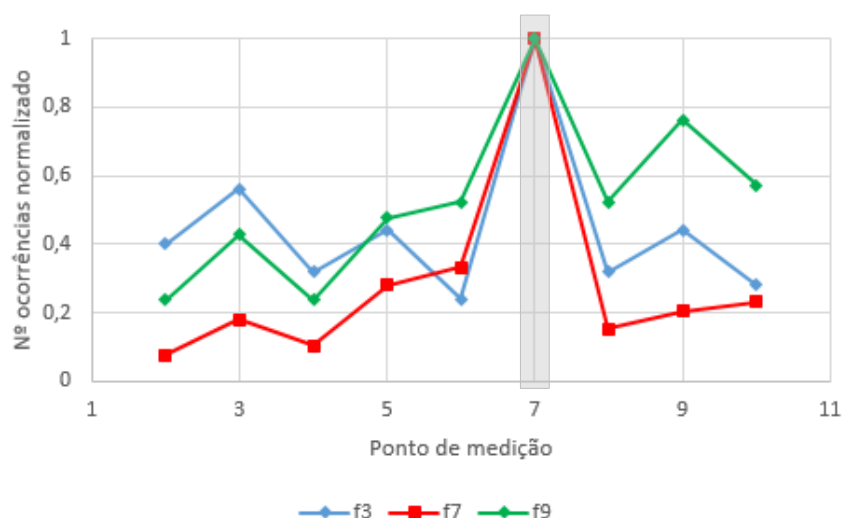


Figura 3.30-Influência dos intervalos de frequência no indicador FRF_SC (parte imaginária)

Com o comportamento verificado na Figura 3.30 é possível afirmar que a parte imaginária também é influenciada pela localização da força aplicada, no entanto o sucesso do método para a localização de dano não sofre tanto com a mesma como verificado com a parte real, a elevação existente antes da localização do dano aquando a aplicação da força no ponto 3 encontra-se menos evidente que no caso anterior, outro facto a relatar é a diferença observada aquando a aplicação da excitação após o dano, em que, ao contrário do observado com a utilização da parte real, este consegue encontrar o dano com sucesso. Ainda em relação à Figura 3.30 é possível verificar que a melhor localização do dano ocorre quando a excitação é aplicada no ponto onde o dano se localiza. Ainda a título de ilustrar o comportamento da parte real e imaginária ao longo dos diversos níveis de dano consultar ANEXO A.

3.3.4 RESIDUAL IMAG FRF SHAPE (RIFS)

Para além do estudo da parte imaginária realizado para o método das curvaturas é agora apresentado a técnica de *Liu et al* [44] onde o autor propõe a diferença entre a parte imaginária da receptância da estrutura sã e danificada para a localização de dano. A Figura 3.31 ilustra o raciocínio realizado pelo autor. Em primeira fase é extraída a parte imaginária dos dados obtidos relativos às FRFs e a sua normalização em relação à unidade, posteriormente é realizado a diferença entre a parte imaginária da FRF da estrutura sã e danificada. Finalmente com as diferenças realizadas a cada frequência é aplicada novamente uma normalização à unidade e verificada a coordenada i a que ocorre a diferença máxima, correspondendo esta à localização do dano.

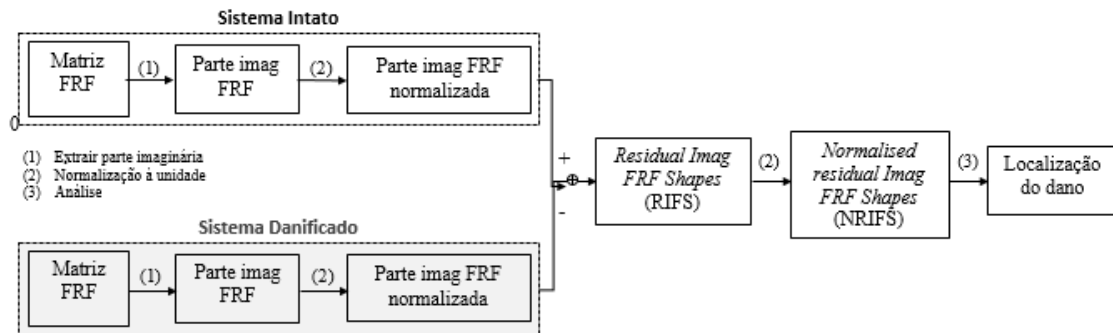


Figura 3.31-Esquema do método de localização de dano com parte imaginária, adaptado de [44]

Após a obtenção das diferenças normalizadas, denominadas pelo autor como *Normalized Residual Imag FRF Shapes* (NRIFS), foi necessário analisar as mesmas de forma a fornecer a localização efetiva do dano. Para tal o autor utiliza um mapa de distribuição onde apresenta o comportamento das NRIFS ao longo da banda de frequências para cada ponto de medição. A Figura 3.32 exemplifica a técnica de *Liu et al* [44]. No entanto a distribuição das NRIFS é realizada com o seu valor absoluto de modo a colocar a sua variação entre apenas 0 e 1, sendo que 1 diz respeito à diferença máxima e consequentemente a presença de dano. A Figura 3.32 ilustra os testes desenvolvidos para o método proposto na situação de dano de 10%, a excitação é provocada no ponto 3 na gama de frequência de 0-400 Hz sem a presença de ruído.

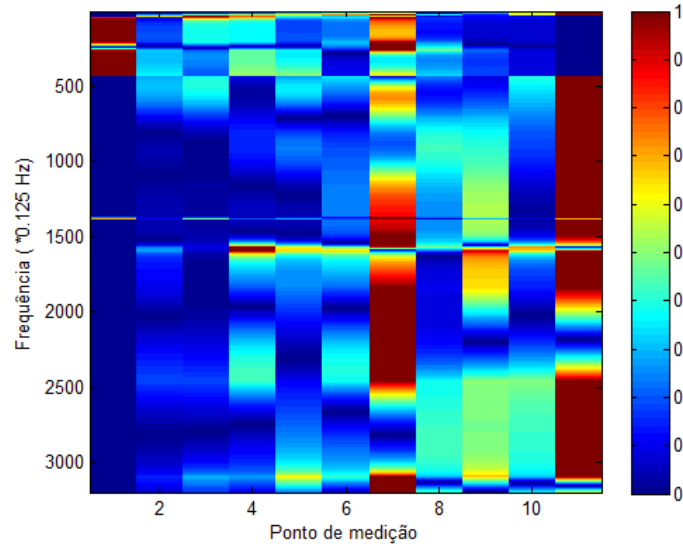


Figura 3.32- Distribuição de NRIFS para situação sem ruído, força aplicada no ponto 3.

Para além das diferenças máximas obtidas para o ponto referente ao dano (ponto 7) surge uma variação máxima no extremo da viga (ponto 11), este fato irá condicionar o sucesso do método. Para além da representação realizada na Figura 3.32 é apresentado neste trabalho uma metodologia alternativa onde o estudo é apresentado através da utilização da soma total do valor absoluto das NRIFS ao longo de toda a gama de frequências, ou seja:

$$SUM_NRIFS = \sum_{\omega} |NRIFS| \quad (3.11)$$

Com a utilização do indicador SUM_NRIFS (Figura 3.33) é possível verificar que o mesmo fornece uma imagem mais clara dos resultados obtidos que a apresentada pela Figura 3.32, para as condições de simulação estabelecidas. Ainda com o objetivo de aperfeiçoar a sensibilidade do mesmo é proposto neste trabalho a implementação do sistema de contagem de ocorrências já exemplificada na aplicação do indicador FRF_SC.

Como tal para cada frequência ω é verificado então a coordenada onde ocorre o valor máximo de NRIFS, contabilizando o mesmo como ocorrência. Após o estudo em toda a gama de interesse é contabilizado todas as ocorrências em cada ponto de medição, o máximo valor encontrado corresponde desta forma à localização do dano. No entanto é verificado com a Figura 3.32 e Figura 3.33 a existência de um valor máximo no ponto 11, prejudicando a correta localização do dano.

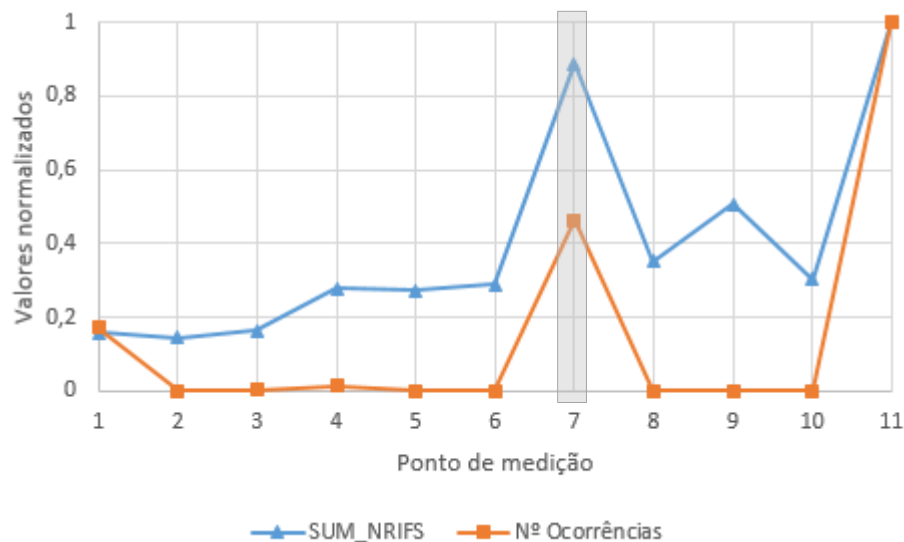


Figura 3.33- Aplicação do critério SUM_NRIFS e sistema de contagem de ocorrências

Próximo passo no estudo, correspondeu a aplicar ruído branco (2%) à parte imaginária das receptâncias e verificar os resultados obtidos com aplicação do método proposto. Os resultados obtidos aquando a presença de um dano de 10% e uma força aplicada em 3 são expostos na Figura 3.34.

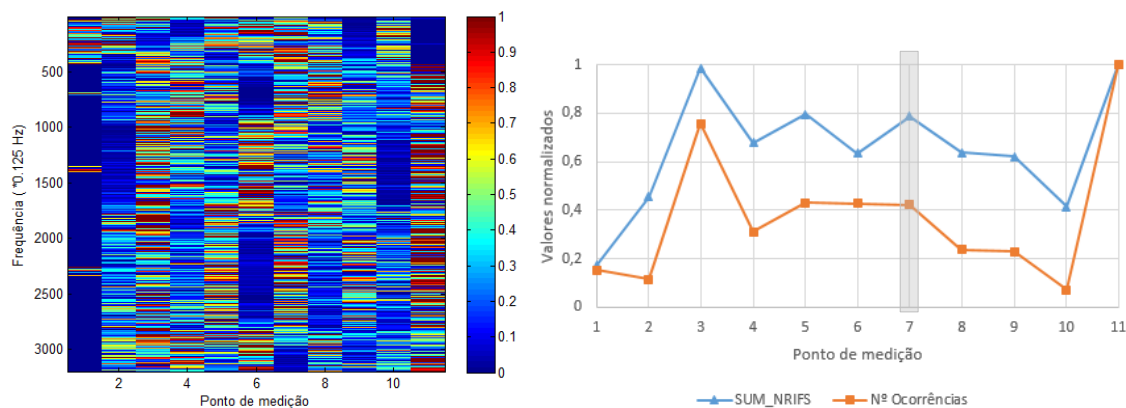


Figura 3.34- Resultados obtidos do indicador NRIFS, SUM_NRIFS e ocorrências de NRIFS para a situação de 2% ruído

Com a análise da Figura 3.34 é possível verificar que o método é sensível à presença de ruído nos dados utilizados, não oferecendo uma localização do dano correta. Na tentativa de diminuir os efeitos do ruído no indicador é proposto aqui a utilização da metodologia dos intervalos de frequência.

3.3.4.1 IMPLEMENTAÇÃO DOS INTERVALOS DE FREQUÊNCIA

A implementação dos intervalos de frequências, na aplicação do indicador FRF_SC (capítulo 3.3.3), mostrou conseguir minimizar o efeito que o ruído, presente nas FRFs medidas, tem quando é aplicado o dito indicador. Assim sendo, é igualmente proposto nesta etapa a aplicação do mesmo raciocínio, utilizando 100 intervalos de 4 Hz. Os resultados obtidos encontram-se expostos na Figura 3.35, onde a localização do dano, para a aplicação da força em 3 não consegue ser obtida, sofrendo com um segundo pico máximo no extremo da viga, tal como verificado na situação sem ruído.

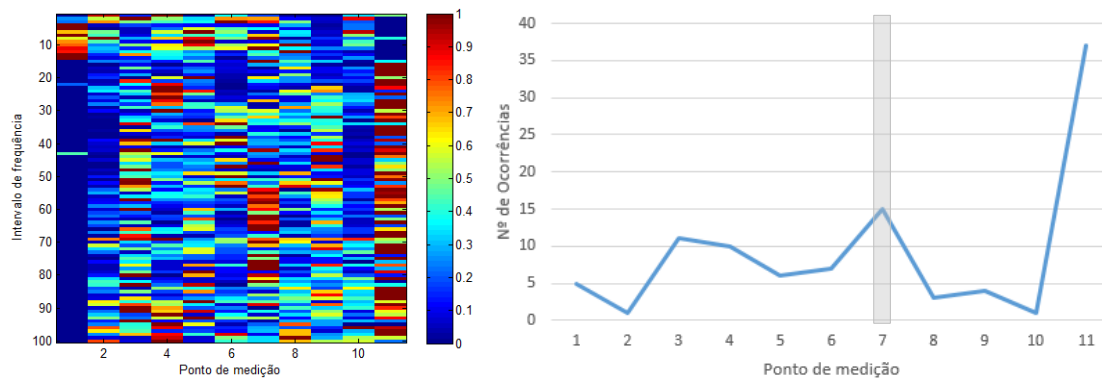


Figura 3.35-Implementação dos intervalos de frequência nas *Normalized Residual Imag FRF Shapes*

3.3.4.2 LOCALIZAÇÃO DA EXCITAÇÃO

Ainda em relação à aplicação das RIFS, foram realizados testes de modo a estudar a possível influência da localização da força na correta localização do dano, para tal foi estudada a situação relativa à redução em 10% da espessura da viga no elemento 600 (ponto 7), com a excitação aplicada no ponto 3, 7 e ainda no ponto 9.

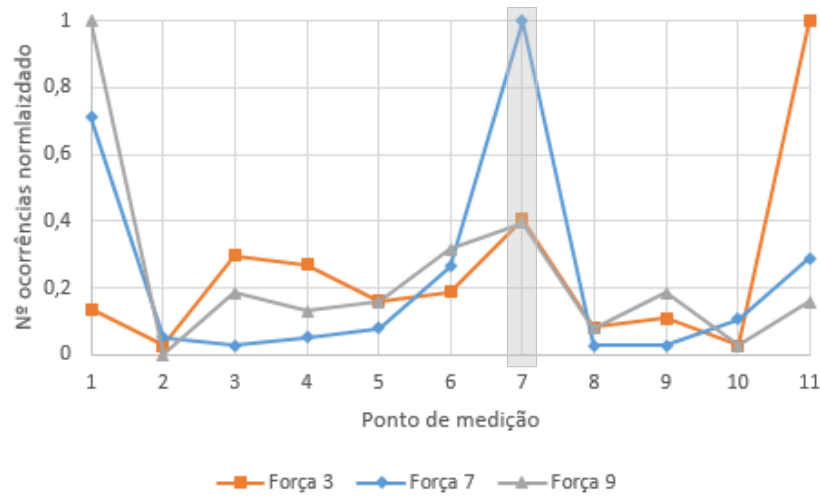


Figura 3.36- Variação no método de NRIFS para diferentes posições da força de excitação da estrutura

Como representado na Figura 3.36 o ponto onde a excitação é aplicada influencia os resultados obtidos. Os picos máximos observados nas extremidades da viga parecem apresentar uma relação direta com a posição da força. Quando a força é aplicada no ponto 3 o pico máximo surge na extremidade oposta (em 11), o mesmo ocorre quando a excitação é aplicada em 9, em que neste caso o pico máximo ocorre no ponto 1. Ainda em relação à Figura 3.36 o resultado mais satisfatório é verificado quando a excitação é aplicada no ponto 7, ponto este coincidente com o ponto onde a estrutura se encontra danificada.

3.3.5 CONCEITO DE CURVATURA APLICADO ÀS RIFS

Para além da aplicação da diferença entre parte imaginária da receptância obtida para a estrutura intacta e danificada, *Liu et al* [44] propõe a aplicação da segunda derivada às *Residual Imag FRF Shapes*, de forma a evidenciar a posição do dano e aumentar a sensibilidade da metodologia.

$$RIFS''_{i,k}(\omega) = \frac{RIFS_{i+1,k}(\omega) - 2 * RIFS_{i,k}(\omega) + RIFS_{i-1,k}(\omega)}{h^2} \quad (3.12)$$

Onde h diz respeito à distância entre pontos de medição $i+1$ e $i-1$, k representa o ponto de excitação e ω corresponde à frequência a que foi calculado o indicador. De notar que para o caso das extremidades da viga o cálculo da curvatura não é possível, não serão então abordadas.

A Figura 3.37 apresenta os resultados obtidos com a aplicação da segunda derivada às *Residual Imaginary FRFs* comparativamente ao obtido com o método das *Normalized Residual*

Imaginary FRF Shapes (NRIFSs) sem a poluição provocada pelo ruído. Os resultados apresentados correspondem à contagem do número máximo de ocorrências, em que é definida como ocorrência o valor da curvatura máxima verificada a cada frequência, fornecendo assim a localização do dano para a situação de dano de 10% (Tabela 3.2) e aquando da aplicação da excitação no ponto 3.

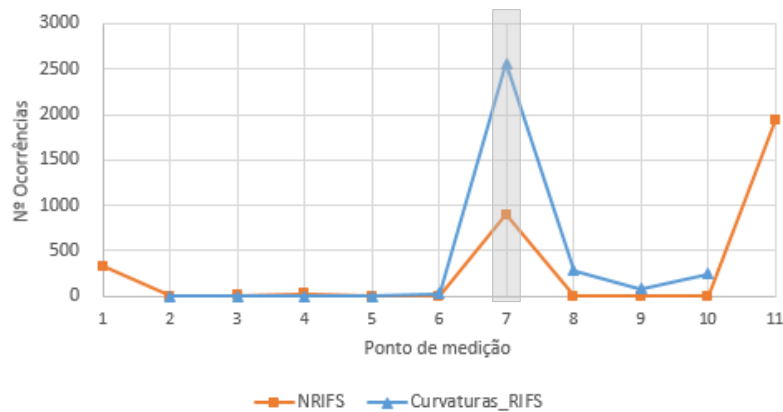


Figura 3.37- Resultados obtidos com aplicação da segunda derivada às RIFS

A utilização da segunda derivada para a magnificação da anomalia da curva teve sucesso (consultar ANEXO B para ilustração da melhoria do método nas frequências naturais). A posição onde foi imposto o dano apresenta um número de ocorrências superior ao obtido com a aplicação das NRIFS fornecendo assim uma clarificação da localização do dano.

3.3.5.1 SENSIBILIDADE AO RUÍDO

Para a situação de análise onde se verifica a presença de ruído branco foi realizado o cálculo das curvaturas em cada ponto de medição (exceto o ponto 1 e 11), ao longo da gama de frequências estudada, a excitação foi aplicada no ponto 3. Na Figura 3.38 encontram-se ilustrados através de um mapa de distribuição os resultados obtidos para a situação onde: (a) não se verifica a presença de ruído e (b) com ruído (2% ruído branco), salientando que as ocorrências (valores máximos da segunda derivada normalizados) são representadas pela cor vermelha.

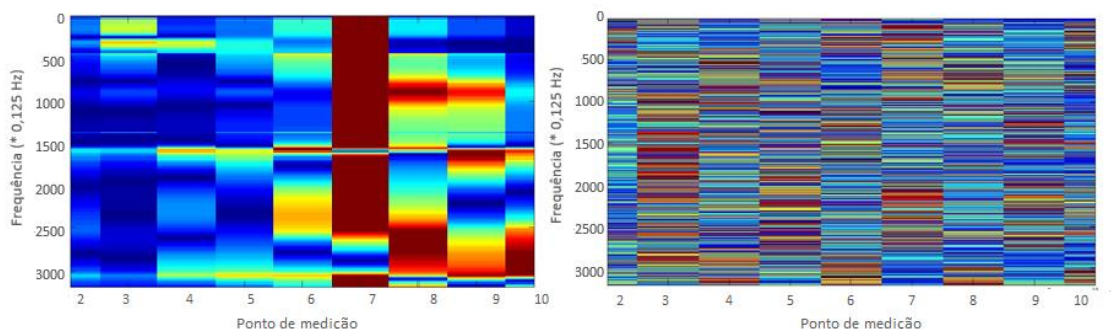


Figura 3.38- Distribuição das curvaturas máximas normalizadas para o estado sem e com ruído respectivamente

A Figura 3.38 fornece uma leitura abrangente dos dados obtidos aquando sujeitos a ruído. É verificado que método das curvaturas de RIFS, tal como o método das *Residual Imag FRFs*, é sensível à presença do ruído, tornando impossível a correta localização de dano.

3.3.5.2 APLICAÇÃO DE INTERVALOS DE FREQUÊNCIA

Na tentativa de atenuar o efeito do ruído foi aplicada a técnica dos intervalos de frequência, já utilizada nos métodos anteriores. As receptâncias poluídas são divididas em 100 intervalos de frequência (contendo cada um destes 32 linhas de frequência), sendo posteriormente calculados os MOVs médios. A Figura 3.39 demonstra os efeitos desta abordagem na distribuição das curvaturas máximas normalizadas e na contagem das ocorrências associadas.

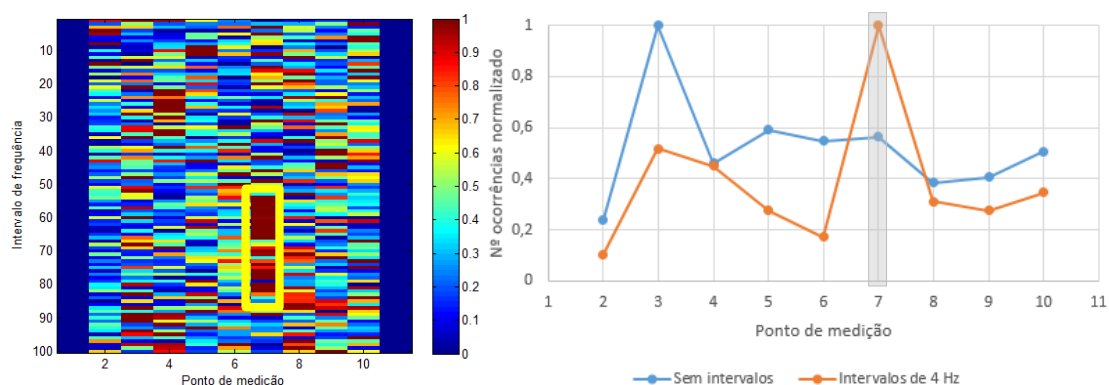


Figura 3.39- Efeito dos intervalos de frequência para o método das curvaturas de RIFS (0-400 Hz)

Através dos resultados obtidos pode verificar-se que para além de diminuir a instabilidade dos dados obtidos, a aplicação da técnica dos intervalos de frequência permitiu encontrar uma gama de frequências onde o método das curvaturas de RIFS tem um melhor comportamento (Figura 3.39). Esta banda ótima está localizada entre o intervalo 54 e 84 (216-336 Hz aproximadamente). Os resultados obtidos pelo método neste intervalo encontram-se expostos na Figura 3.40.

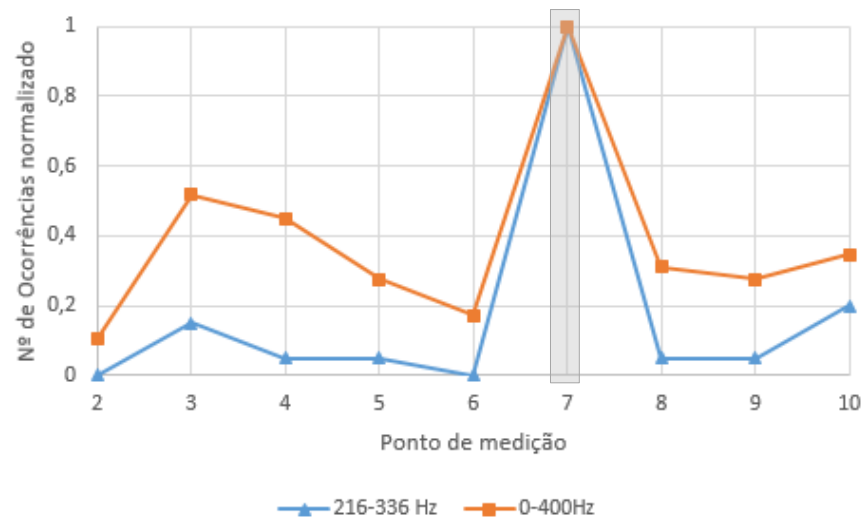


Figura 3.40- Resultados obtidos com a banda ótima de frequências no método das curvaturas de RIFS

Assim, para o método das curvaturas das *Residual Imag FRF Shape* é possível afirmar que este se encontra otimizado para a modelação numérica em causa.

3.4 RESUMOS

3.4.1 DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DANO

Tabela 3.5- Resumo dos métodos de detecção de dano para caso numérico

Método	Parâmetros testados	Comportamento	Sucesso
<i>MAC</i>	Nº modos	Para modos mais altos a variação devido ao dano é verificada mais cedo	Não
	Ruído	-	-
<i>DRQ</i>	Ruído	Variação reduzida	Possível
<i>AIGAC</i>	Ruído	Não varia	Possível
<i>TDI</i>	Ruído	Não varia	Possível
<i>WDI</i>	Ruído	Não varia	Sim
	Expoente m	Aumenta sensibilidade, adaptável à situação	Sim

Tabela 3.6-Resumo de métodos de localização de dano para caso numérico

Método	Parâmetros testados	Comportamento	Sucesso
<i>COMAC</i>	Sem ruído	Variação reduzida	Não
<i>MMSD</i>	Nº de modos	Com o somatório de modos os resultados melhoram	Sim
<i>FRF_SC</i>	Sem ruído, ocorrências	Implementação das ocorrências ajuda bastante	Sim
<i>FRF_SC</i> (parte real) & <i>FRF_SC</i> (parte imaginária)	Ruído	Problemas com identificação	Não
	Intervalos de frequência	Alivia o efeito do ruído	Sim
	Localização das Forças	Localização é igualmente encontrada mas surge alterações	
	Somatório de forças	Uniformiza resultados	
<i>NRFIS</i>	Sem ruído	Variação com a força aplicada	Possível
	Ruído	Distorções nos resultados	Não
	Intervalos de frequência	Diminui poluição dos resultados	Possível
	Localização da força	Para forças aplicadas no dano a detecção do mesmo é intensificada	Possível
Curvaturas de <i>RIFS</i>	Soma total	Consegue oferecer a localização	Sim
	Ocorrências	Melhora resultados	Sim
	Ruído	Distribuição de ocorrências distorcida	Não
	Intervalos de frequência	Melhora resultados, aponta para gama de frequências ótima	Sim

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO

No caso experimental foi utilizada uma viga metálica de comprimento, L , de 1001 mm com secção transversal retangular de $34.5 \times 6 \text{ mm}^2$ e massa total de 1.618 Kg (já incluindo os vários acelerómetros de 4.8g), as restantes características geométricas relevantes são ilustradas pela Figura 4.1.

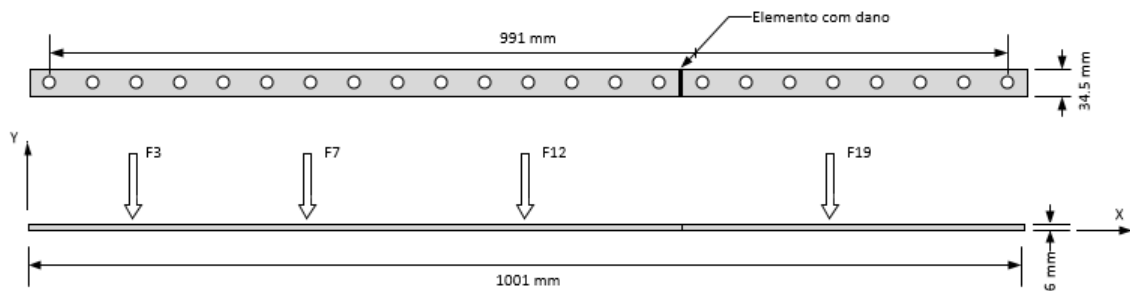


Figura 4.1-Características geométricas da viga em caso experimental

A viga foi suspensa por cabos com o intuito de simular a condição de apoio livre-livre (Figura 4.3). A resposta da viga foi registada em 23 pontos uniformemente espaçados de 45.1 mm ao longo do comprimento de 991 mm. A excitação pseudo aleatória foi aplicada, recorrendo à utilização de um vibrador *Bruel&Kjaer* 4809 equipado com um amplificador *Bruel&Kjaer* 2706, em quatro pontos distintos como se mostra na Tabela 4.1 e Figura 4.1. A força aplicada foi medida através de um transdutor de forças *Bruel&Kjaer* 8200.

A resposta foi medida através de 23 acelerómetros, *Bruel&Kjaer* 4507/8, os sinais foram transmitidos à unidade de Aquisição de dados *Multi-channel Bruel&Kjaer* 2816 (PULSE) e analisados diretamente pelo *Labshop* 6.1 instalado num computador portátil (*Dell series* 400).

Tabela 4.1-Localização das forças aplicadas

Força	1	2	3	4
Acelerómetro correspondente	3	7	12	19
Distância à origem (mm)	90	270	495	810

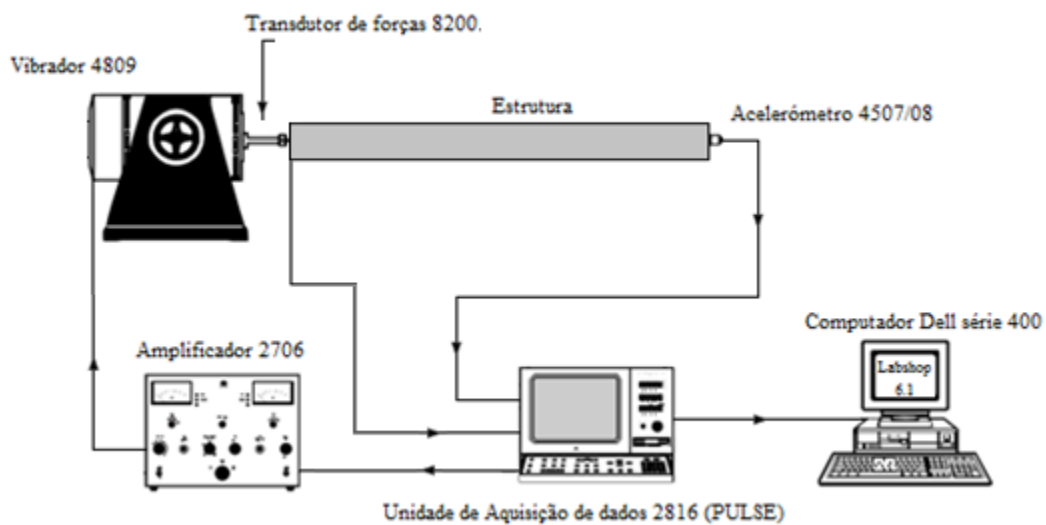


Figura 4.2- Instrumentação para análise estrutural do caso experimental

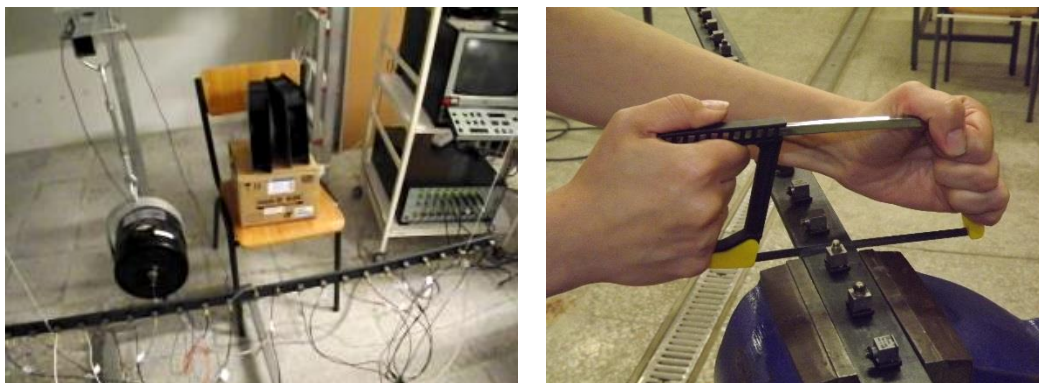


Figura 4.3 -Viga suspensa com montagem (esquerda) e aplicação do dano (direita)

4.1.1 APLICAÇÃO DO DANO

A aplicação do dano é realizada através da redução da espessura entre o ponto 15 e 16 (Figura 4.3), levando à diminuição da rigidez no mesmo. Foram aplicados oito níveis de dano, a cada novo nível a espessura foi reduzida de aproximadamente 0.5 mm em relação ao nível de dano anterior, tal facto pode ser observado na Tabela 4.2. É ainda de salientar que a largura do rasgo realizado (Figura 4.3) foi de aproximadamente 1.0 mm.

Tabela 4.2-Aplicação de dano para 8 estágios

Nível de dano	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08
Redução de espessura (mm)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Novo valor (mm)	5.5	5	4.5	4	3.5	3	2.5	2

4.1.2 FREQUÊNCIAS NATURAIS, MODOS DE VIBRAÇÃO E FRFs

Nesta secção são apresentadas as alterações que a progressão do dano (Tabela 4.2) provoca nas frequências naturais, modos de vibração e nas funções de resposta em frequência. Na Tabela 4.3 é evidenciado as variações verificadas nas primeiras seis frequências naturais, presentes na gama de frequências compreendida entre 0-800 Hz, para os 8 níveis de dano

Tabela 4.3- Variação das frequências naturais perante os diversos níveis de dano

Nível dano	Frequências (Hz)					
	1º modo	2º modo	3º modo	4º modo	5º modo	6º modo
Sem dano	31.75	82.25	159.75	263.75	395.75	555.00
D01	31.50	82.50	160.00	264.00	395.75	555.50
D02	31.50	82.25	159.75	263.75	395.50	555.25
D03	31.50	82.00	159.75	263.50	394.75	554.75
D04	31.50	81.50	159.75	262.50	393.75	555.00
D05	31.50	81.25	159.50	261.75	392.25	555.25
D06	31.50	81.00	159.50	261.75	391.50	554.50
D07	31.50	80.75	159.25	260.75	390.00	554.50
D08	31.25	80.00	159.25	259.25	387.00	554.25

É possível verificar com a Tabela 4.3 que as frequências naturais diminuem com o avançar do estágio do dano. No entanto os valores relativos às frequências naturais obtidas no sexto modo de vibração apresentam uma variação inconstante, não indo de encontro ao verificado nos restantes casos. Ainda em relação às variações nas frequências naturais é verificado que os valores obtidos para o estágio de dano D01 são incoerentes. Os dados obtidos são superiores à situação sem dano. A resolução do sistema utilizado remete a 3200 linhas de frequência (resolução de 0.25 Hz).

De seguida é apresentado o comportamento dos primeiros seis modos para os primeiros três níveis de dano D01, D02, D03 correspondendo à redução da espessura h em 0.5, 1 e 1.5 mm respetivamente (Tabela 4.2).

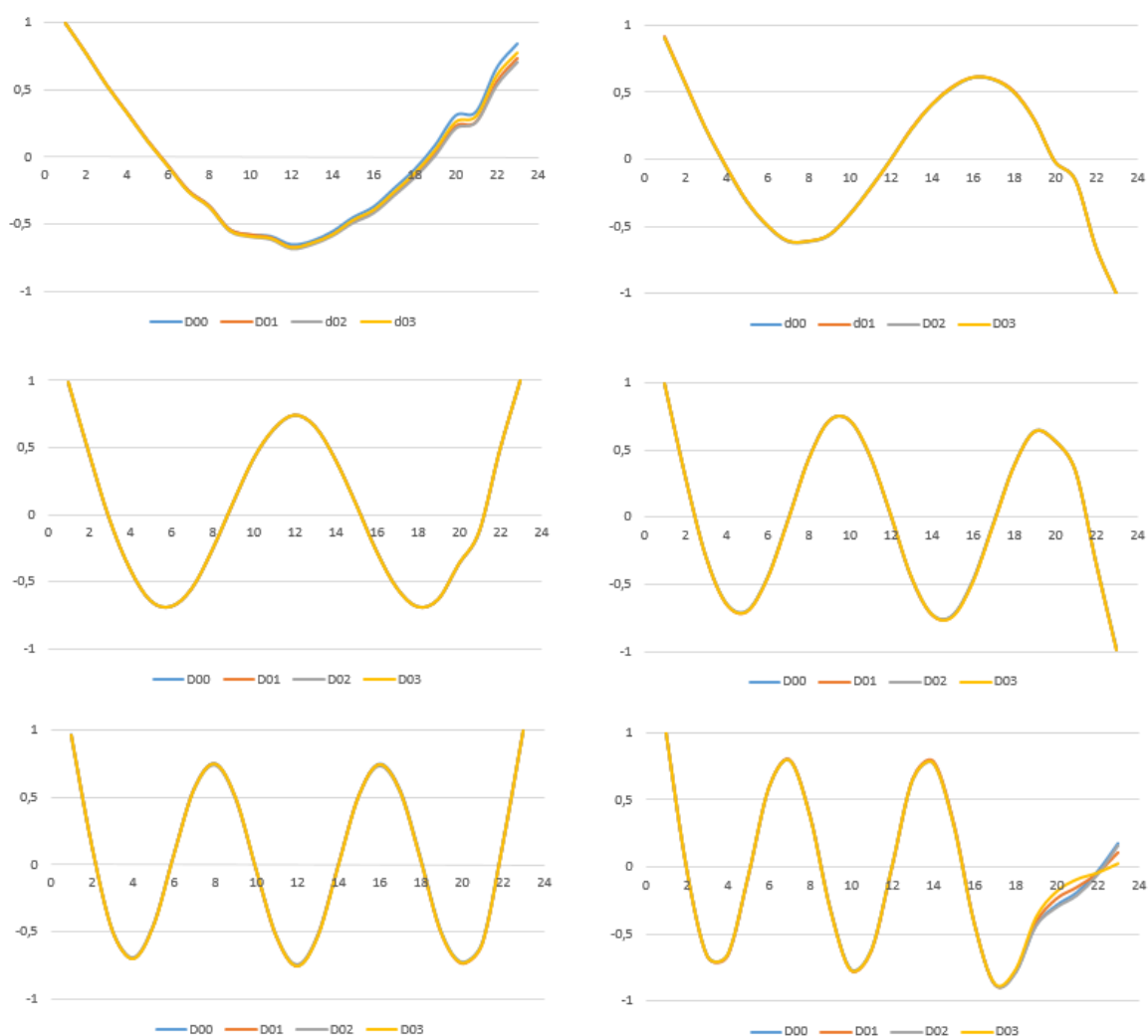


Figura 4.4- Modos de vibração obtidos experimentalmente para os diversos níveis de dano

É possível verificar que as alterações nos modos de vibração não são visivelmente significativas, com exceção do primeiro modo onde se notam algumas divergências. Nesse mesmo modo é notório que os valores apresentados pelos acelerómetros 11 e 21 não correspondem ao que seria esperado, tal facto é também observado no comportamento exibido pelo acelerómetro 21, no segundo, terceiro e sexto modo. A observação atrás referida levou a que a informação relativa às FRFs adquiridas com estes acelerómetros não fosse considerada.

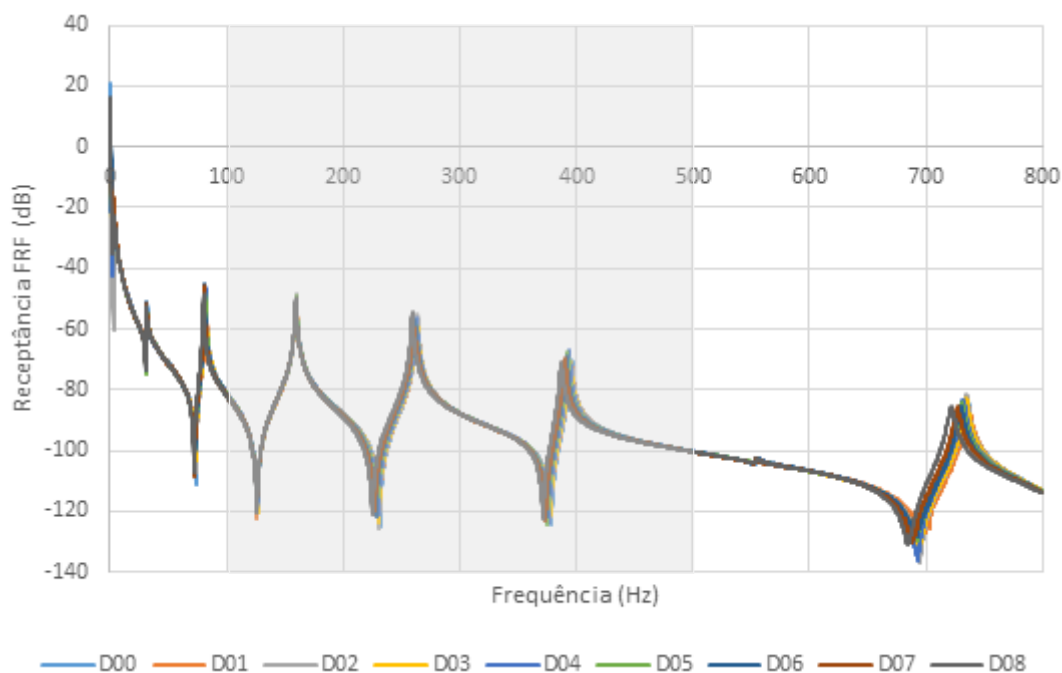


Figura 4.5-Variação das FRFs obtidas pelo acelerômetro 19 sujeito à força em 19

Tal como foi verificado no caso numérico, a existência de ruído nas FRFs medidas tem influência no sucesso dos métodos de detecção e localização de dano. Na tentativa de diminuir as dificuldades verificadas na aplicação dos diversos indicadores, foi escolhida uma gama de frequências compreendida entre 100-500 Hz, em que as FRFs medidas apresentam um comportamento menos poluído.

4.2 DETECÇÃO DO DANO

Na fase relativa à detecção de dano irão ser aplicados os indicadores que utilizam diretamente as receptâncias na sua formulação, ou seja, os indicadores DRQ e AIGAC, bem como os indicadores que utilizam as transmissibilidades, TDI e WDI.

4.2.1 DRQ e AIGAC

Tal como realizado para o caso de estudo numérico, também agora, para o caso de estudo experimental será testada a eficiência dos indicadores de detecção do dano anteriormente referidos. Na Figura 4.6 são apresentados os resultados obtidos com os indicadores AIGAC e DRQ, para 8 níveis de dano (Tabela 4.2) e para a gama de frequências considerada (100-500 Hz). No cálculo do indicador DRQ e AIGAC é considerado a aplicação das quatro forças, uma de cada vez (Tabela 4.1).

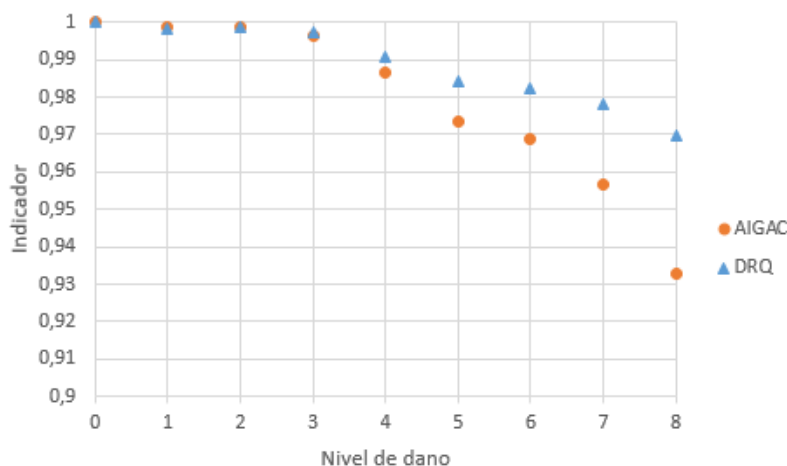


Figura 4.6- Resultados obtidos com os indicadores DRQ e AIGAC para o caso de estudo experimental.

A variação do indicador DRQ, para a gama de frequências definida, é muito reduzida, sendo a variação máxima registada de $3 \cdot 10^{-2}$ na situação de dano 8. No caso de AIGAC a variação mostrou-se superior ao DRQ, principalmente para os níveis de dano superiores ao terceiro nível.

4.2.2 TDI e WDI

Tal como verificado em outros trabalhos [39] o indicador TDI melhora a sua capacidade de deteção quando é considerada a aplicação de diversas forças. Com a intenção de validar esta afirmação para dados experimentais os indicadores TDI e WDI foram testados para diversos números de forças aplicadas.

O primeiro caso de estudo inclui as forças aplicadas à viga nos pontos 3 e 7, o segundo contabiliza a aplicação das quatro forças envolvidas. Em primeira fase é apresentado a Figura 4.7, que representa a distribuição do indicador MRVAC para o segundo caso de estudo (4 forças) na gama de frequências de 100-500 Hz para quatro dos oito níveis de dano referidos na Tabela 4.2.

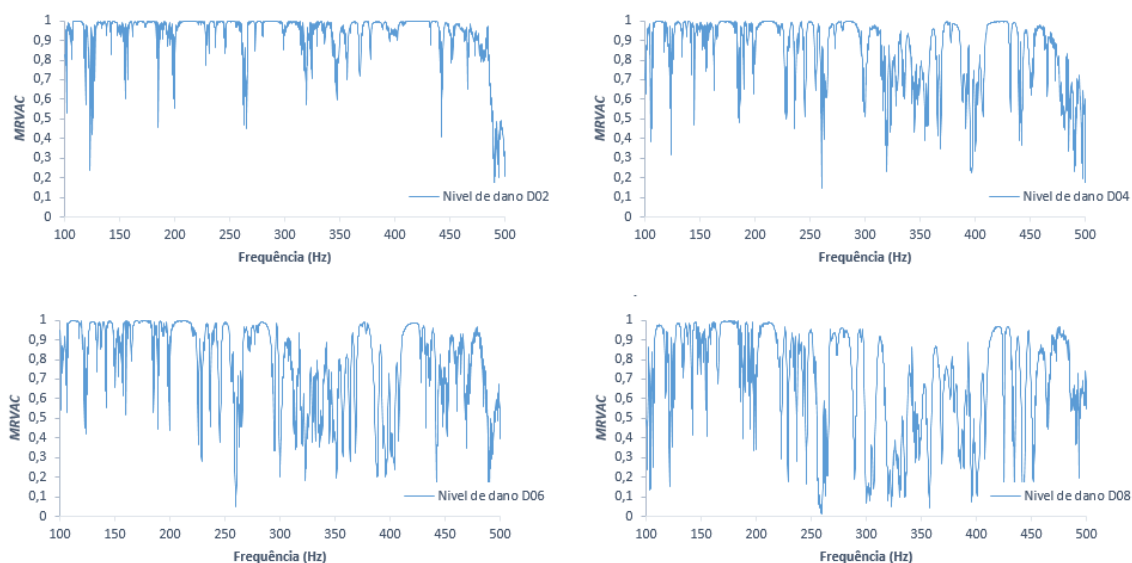


Figura 4.7- Distribuição do indicador MRVAC para quatro diferentes níveis de dano aplicados ao caso de estudo experimental

A distribuição do indicador MRVAC obtida ao longo dos diversos estágios de dano demonstra que, com o aumento do nível de dano a variação do indicador também aumenta, facilitando a detecção de dano.

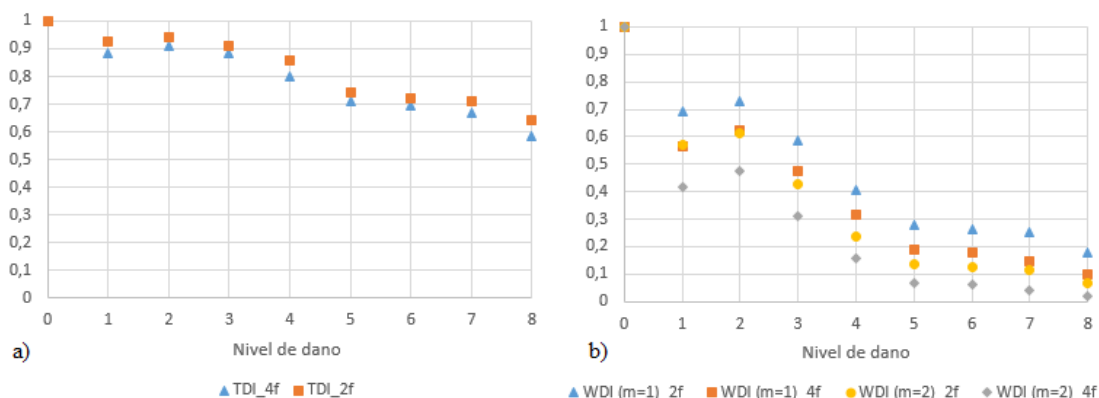


Figura 4.8- Resultados do indicador (a) TDI e (b) WDI para diferentes números de forças incluída

Tal como referido anteriormente a Figura 4.8 ilustra os resultados obtidos pelo indicador TDI e WDI para dois casos distintos de aplicação de forças. Em (a) é verificado que o indicador TDI perante a aplicação de maior número de forças (que neste caso será as quatro forças envolvidas (Tabela 4.1)), consegue melhorar a sua sensibilidade para todos os níveis de dano. Em (b) é exposto o comportamento do indicador WDI em que se confirma que a utilização da informação relativa a um maior número de forças também melhora os resultados obtidos.

É de notar a existência de uma discrepância na medição do nível de dano D01 em que os valores obtidos com os diferentes indicadores se encontram inferiores ao obtido em D02, tal não vai de encontro com o esperado teoricamente. No entanto é espetável que o comportamento difira com o obtido no modelo numérico pois foi verificado inconsistências nos dados relativos às frequências naturais para o nível de dano D01 em ambiente experimental (Tabela 4.3).

4.3 LOCALIZAÇÃO DO DANO

4.3.1 FRF SHAPED CURVATURE (FRF_SC)

Tal como referido na revisão bibliográfica (secção 2.3.4.3), *Maia et al* [43] apresenta a aplicação da 2ª derivada aos modos operacionais de vibração a cada frequência para a localização do dano.

$$H''_{i,k}(\omega) = \frac{H_{i+1,k}(\omega) - 2H_{i,k}(\omega) + H_{i-1,k}(\omega)}{h^2} \quad (4.1)$$

Devido aos problemas relacionados com a utilização dos acelerómetros 11 e 21 estes não serão utilizados na aplicação do método, alterando o cálculo das curvaturas nos pontos vizinhos, nomeadamente pontos 10,12 e 20 para:

$$H''_{i,k}(\omega) = \frac{H_{i+2,k}(\omega) - 2H_{i,k}(\omega) + H_{i-2,k}(\omega)}{(2h)^2} \quad (4.2)$$

De salientar que cálculo das curvaturas os pontos extremos da viga, 1 e 23, tal como no ponto 22 (este devido ao facto do acelerómetro 21 não ter sido considerado) não será realizado.

4.3.1.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO

O indicador proposto para a localização do dano, corresponde ao módulo da diferença das curvaturas obtidas para a estrutura sã e danificada, tendo sido posteriormente utilizada a técnica da contagem do número de ocorrências para cada um dos pontos de medição considerado. Para o caso experimental foi realizado um estudo detalhado da aplicação deste método utilizando, em primeira fase, a receptância no seu valor complexo e posteriormente é utilizado individualmente a parte real e imaginária da receptância. A Figura 4.9 ilustra os resultados obtidos diretamente com o indicador FRF_SC e com a contagem do número de ocorrências, para o estágio de nível de dano D4, quando a força excitadora foi aplicada nos pontos 3 e 9 (isoladamente).

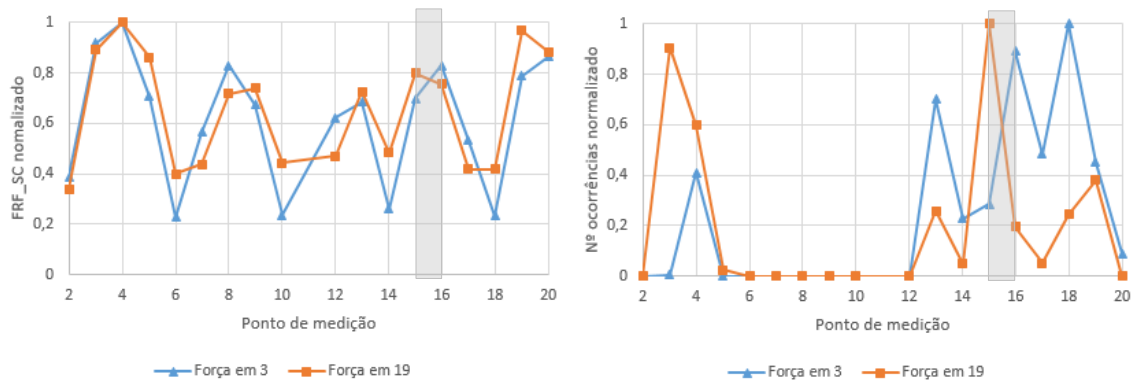


Figura 4.9-Resultados obtidos com FRF_SC e nº de ocorrências associadas para a gama de 100-500 Hz

A Figura 4.9 revela que com a aplicação do indicador FRF_SC não é possível localizar o dano, independentemente da força aplicada. No entanto a contagem do número de ocorrências, quando a força foi aplicada no ponto 19 permite a sua localização, embora de uma forma não muito segura uma vez que foi também registado um outro máximo no ponto 3. Na situação onde a força 3 é aplicada à estrutura o método indica múltiplos picos máximos na região próxima do dano.

Após a apresentação dos resultados obtidos com a utilização da receptância no seu valor complexo, é nesta etapa aplicado o indicador FRF_SC, individualmente, à parte real e imaginária da receptância. As Figura 4.10 a) e b) apresentam os resultados obtidos com esta abordagem, para o mesmo nível de dano (D4) e condições de excitação (Forças 3 e 19) atrás referidas.

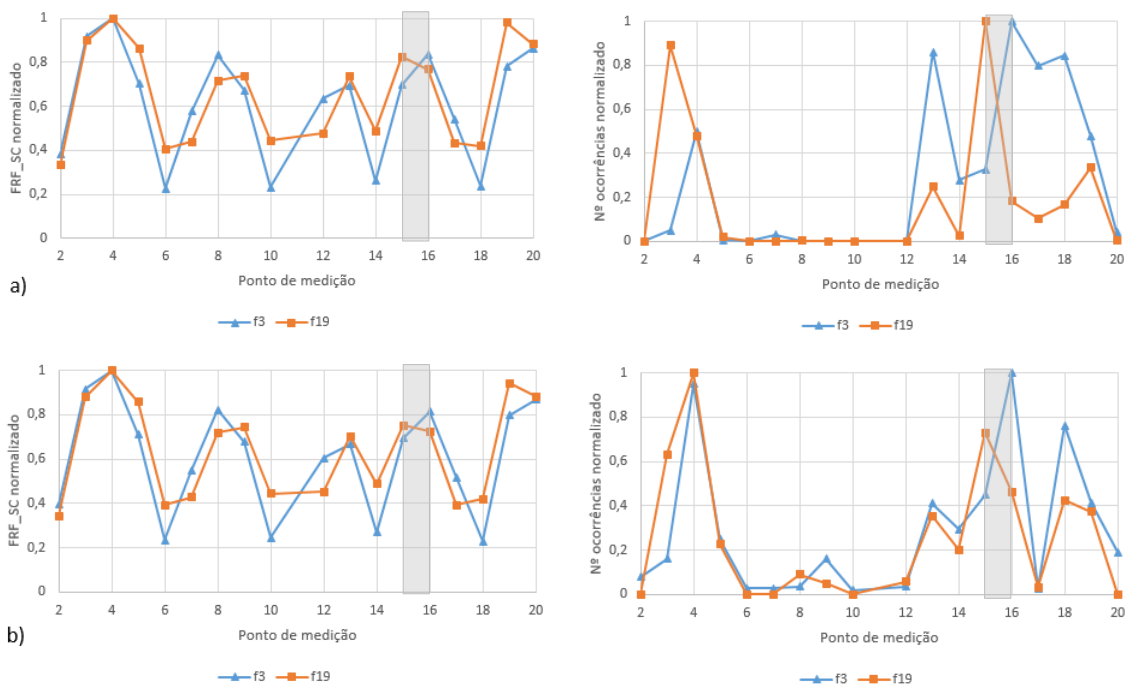


Figura 4.10- Aplicação de FRF_SC com (a) parte real (b) parte imaginária no caso experimental

É verificado na Figura 4.10 que a utilização das diferentes partes da receptância não consegue fornecer uma localização clara do dano, mesmo com o sistema de contagem de ocorrências. No caso da Figura 4.10 a) o sucesso do método é mais sensível à localização da força exercida, aquando a aplicação da força em 19 os resultados obtidos são mais satisfatórios. A Figura 4.10 b) indica que a variação consequente da alteração da força aplicada tem menor impacto, no entanto para dois casos de força expostos o indicador não consegue fornecer a correta localização do dano, surgindo picos secundários nos pontos de medição 4, 18 e 19.

4.3.1.2 IMPLEMENTAÇÃO DOS INTERVALOS DE FREQUÊNCIA

Na tentativa de aumentar a capacidade do indicador em localizar o dano foi aplicada a metodologia empregue no estudo numérico referida como intervalos de frequência. Os resultados obtidos após a aplicação dos intervalos de frequência são apresentados na Figura 4.11, onde a gama de frequências (0-800 Hz) foi dividida em 200 intervalos de 4 Hz (16 linhas de frequência), correspondendo portanto à utilização de 200 MOVs médios. Os resultados demonstrados dizem respeito à gama de frequência de 100-500 Hz (nomeadamente do intervalo 26-125 aproximadamente).

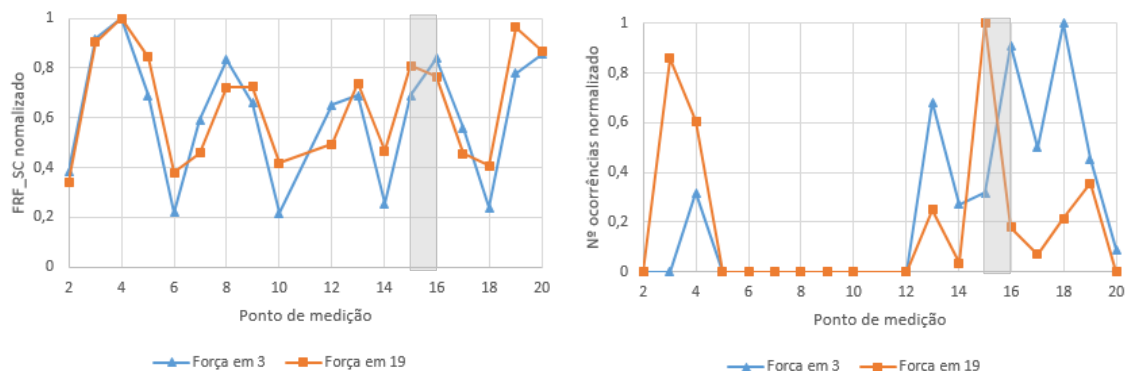


Figura 4.11-Resultados obtidos com FRF_SC e ocorrências com intervalos de 4 Hz

Os resultados apresentados na Figura 4.11 indicam que a utilização da técnica dos intervalos de frequência não conseguiu melhorar significativamente os resultados já obtidos com o indicador FRF_SC (Figura 4.9). No entanto, é ainda analisado a mesma metodologia no caso da utilização da parte real e imaginária individualmente de modo a verificar o efeito da sua aplicação em cada uma das componentes.

A Figura 4.12 e Figura 4.13 ilustram a implementação da contagem do número de ocorrências associada à aplicação do indicador FRF_SC para o nível de dano D04 aquando são aplicadas as forças 3 e 19, com e sem a implementação dos intervalos de frequência de 4 Hz para a gama de frequências de 100-500 Hz.

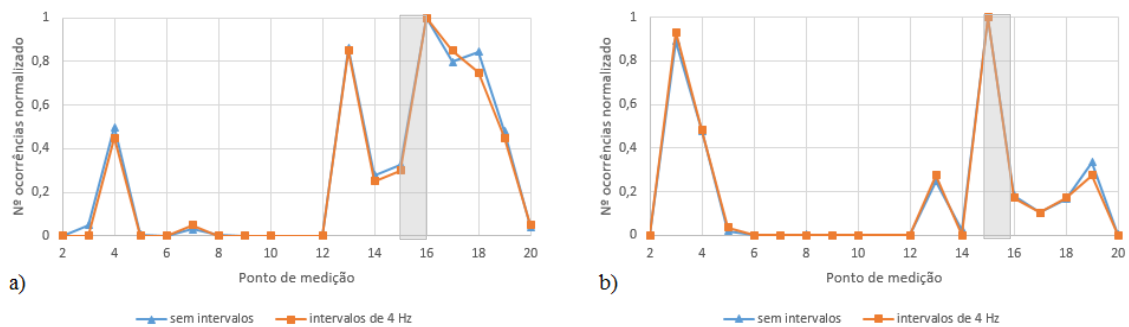


Figura 4.12-Nº de ocorrências de FRF_SC com a parte real (a) força em 3 (b) força em 19

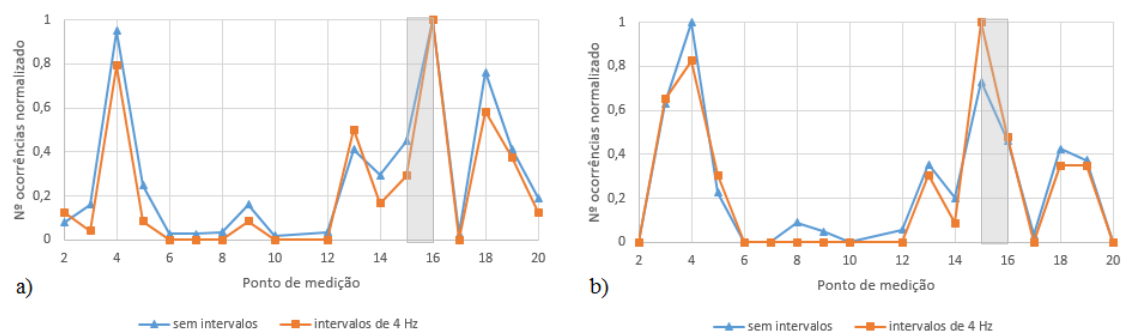


Figura 4.13- Nº de ocorrências de FRF_SC com a parte imaginária (a) força em 3 (b) força em 19

Com a análise da Figura 4.12 é verificado que a utilização dos intervalos de frequência fornece apenas ligeiras melhorias na localização do dano quando é utilizada isoladamente a parte real da receptância no indicador FRF_SC. No entanto registaram-se alterações superiores na implementação desta abordagem aquando da utilização da componente imaginária. A Figura 4.13 b) revelou que através dos intervalos de frequência foi possível reduzir os valores obtidos para quase todos os picos secundários existentes (caso do ponto 4 e 18), conseguindo igualmente fornecer um aumento de sensibilidade no ponto efetivo do dano (ponto 15) em que este se torna o ponto com maior número de ocorrências ao longo da estrutura (para outros níveis de dano consultar ANEXO C).

4.3.1.3 LOCALIZAÇÃO DA FORÇA

Como foi verificado pelos testes anteriores, os resultados obtidos com a aplicação do indicador FRF_SC, com ou sem contagem do nº máximo de ocorrências, são fortemente afetados com a localização da força excitadora, tendo-se verificado que certas forças permitiam localizar o dano com mais certeza que outras. Assim sendo foi utilizado a contribuição de todas as forças envolvidas através do somatório do número de ocorrências obtida aquando a aplicação de cada uma destas (isoladamente). Os resultados obtidos são expostos na Figura 4.14. O caso em estudo engloba a implementação dos intervalos de 4 Hz, para o estágio de dano D4 (Tabela 4.2).

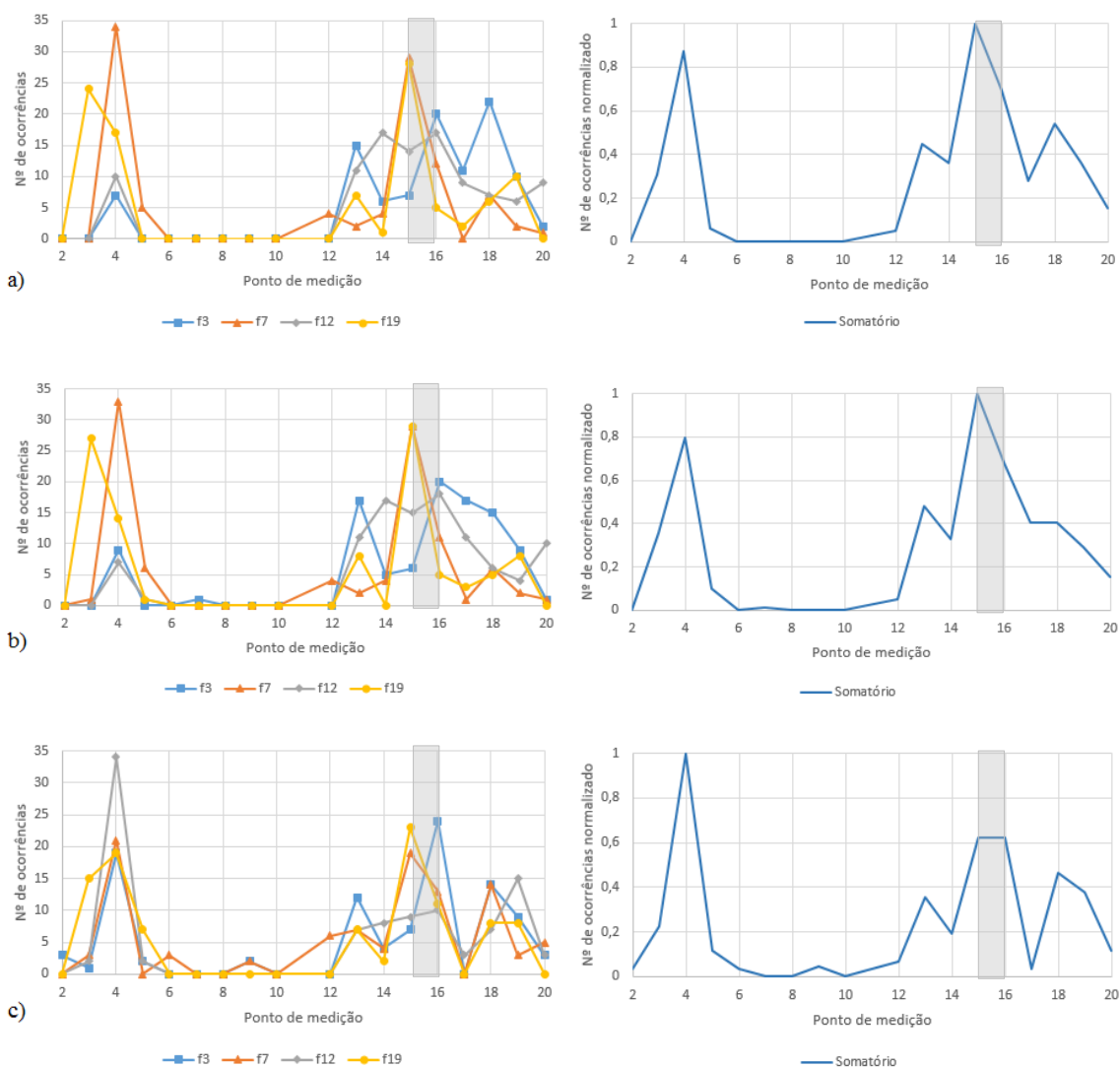


Figura 4.14- Indicador FRF_SC para diversos casos de excitação e efeito do somatório das mesmas com a utilização (a) valor complexo (b) parte real (c) parte imaginária

Com a análise da Figura 4.14 é verificado que a utilização do somatório das forças existentes oferece uma uniformização dos resultados. Relativamente à utilização da parte real, este apresenta resultados semelhantes ao verificado com a utilização do valor em complexo da receptância em que o método indica o pico máximo no ponto 15, seguido de um pico isolado no ponto 4 de valor 0.8 (aproximadamente). Com a parte imaginária o método apresenta o pico máximo no ponto 4 e na localização efetiva do dano (entre o ponto 15 e 16) o indicador apresenta um patamar de valor 0.6 (aproximadamente).

De modo a apresentar uma localização clara do dano é exposto o estudo da distribuição das ocorrências de FRF_SC com a utilização do valor complexo da receptância (Figura 4.15) ao longo da gama de frequências em estudo (100-500 Hz) de forma a encontrar a gama ótima.

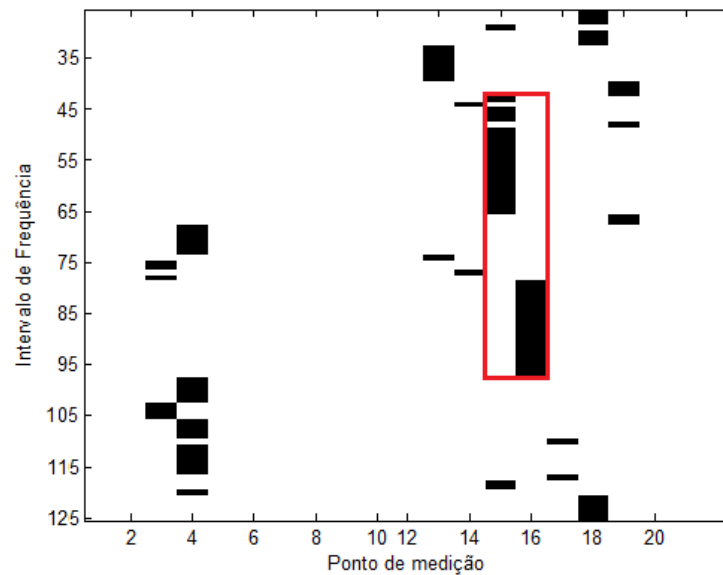


Figura 4.15-Distribuição de ocorrências do indicador FRF_SC (100-500 Hz)

Com a Figura 4.15 é possível estudar o comportamento das ocorrências do indicador FRF_SC aquando a utilização do valor complexo das receptâncias. É verificado que na gama de frequências estudada existe um intervalo em que o método indica a localização exclusiva no ponto 15 e 16, este é encontrada entre o intervalo de frequência 44 e 96 (180-380 Hz aproximadamente). Com a utilização desta gama de frequências, os resultados obtidos são expostos na Figura 4.16.

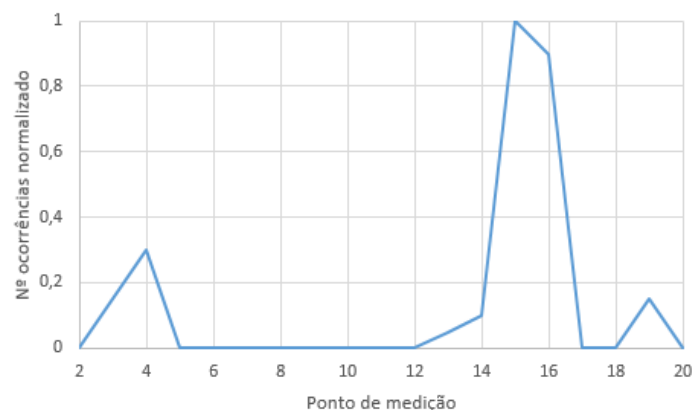


Figura 4.16-Resultados obtidos pelas ocorrências associadas ao indicador FRF_SC (180-380 Hz)

Com os parâmetros inseridos é facilmente observado que a localização do dano se encontra entre o ponto de medição 15 e 16, correspondendo ao esperado, sem a presença de picos

máximos adjacentes para além da pequena variação nos pontos de medição 4 e 20 da estrutura. Desta forma o indicador FRF_SC com as ocorrências associadas encontra-se otimizado para a atividade experimental em causa.

4.3.2 RESIDUAL IMAG FRF SHAPE (RIFS)

Com os dados obtidos experimentalmente é aplicada nesta fase a metodologia apresentada por *Liu et al* [44] em que é determinada a diferença entre as partes imaginárias, normalizadas, da receptância da situação com e sem dano. A Figura 4.17 e a Figura 4.18 ilustram a distribuição das mesmas já normalizadas (onde 1 representa a diferença máxima normalizada) e a contagem de ocorrências para cada ponto ao longo da estrutura. Este teste foi realizado quando a força se encontra aplicada em 3 e 19, para o nível de dano D04.

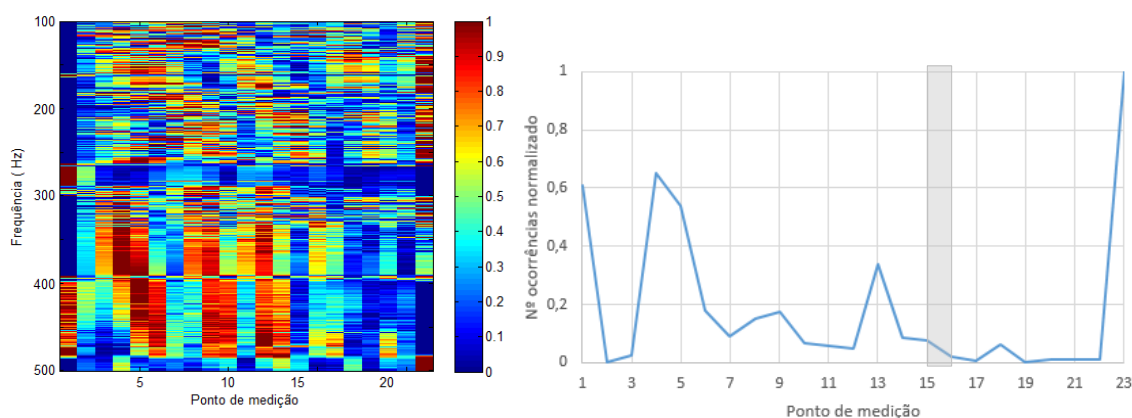


Figura 4.17- Distribuição de NRIFS e contagem de ocorrências aquando a aplicação da força em 3

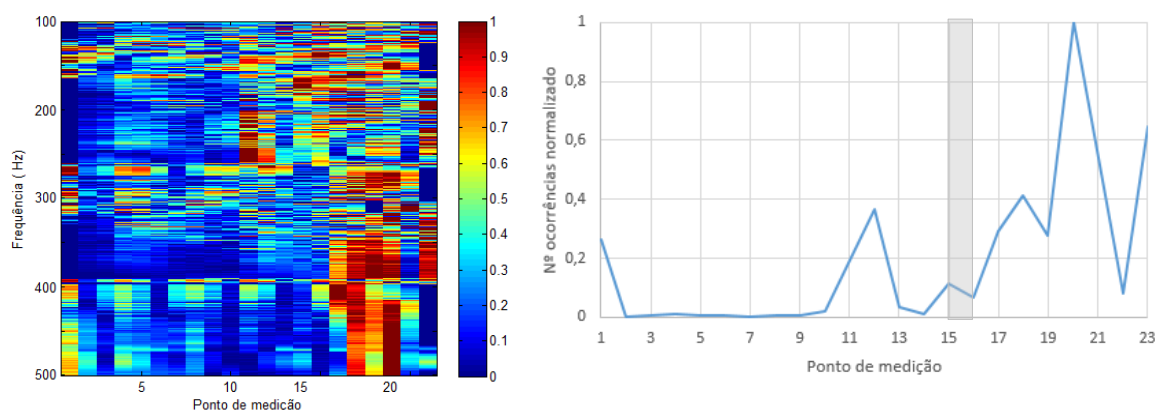


Figura 4.18- Distribuição de NRIFS e contagem de ocorrências aquando a aplicação da força em 19

Ao contrário do verificado no modelo numérico, onde a aplicação das forças remete para diferenças máximas na extremidade contrária, aqui a localização do dano varia de modo diferente:

A Figura 4.17 indica que a força, quando aplicada em 3, conduz a diferenças máximas no ponto 4 e 5 e a um valor máximo no ponto de medição localizado na extremidade da viga (ponto 23), no caso da Figura 4.18, onde a força é aplicada em 19, as diferenças máximas remetem para os pontos entre 17 e 20.

A alteração observada pode advir das condições dos ensaios realizados. A estrutura foi excitada com um vibrador eletromecânico, cuja ligação à estrutura se fazia através de um *push-rod*. Esta ligação compromete as características locais de rigidez e de massa que podem ser a causa do diferente comportamento relativamente ao obtido no modelo numérico.

4.3.2.1 APLICAÇÃO DOS INTERVALOS DE FREQUÊNCIA

Tal como foi realizado no caso numérico é aqui exposto o efeito da implementação da técnica dos intervalos de frequência para o indicador NRIFS. Foram utilizados nesta atividade experimental 200 intervalos de frequência (que na gama de frequência utilizada corresponde a intervalos de 4 Hz). Cada modo operacional médio corresponde à média de 16 linhas de frequência. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.19.

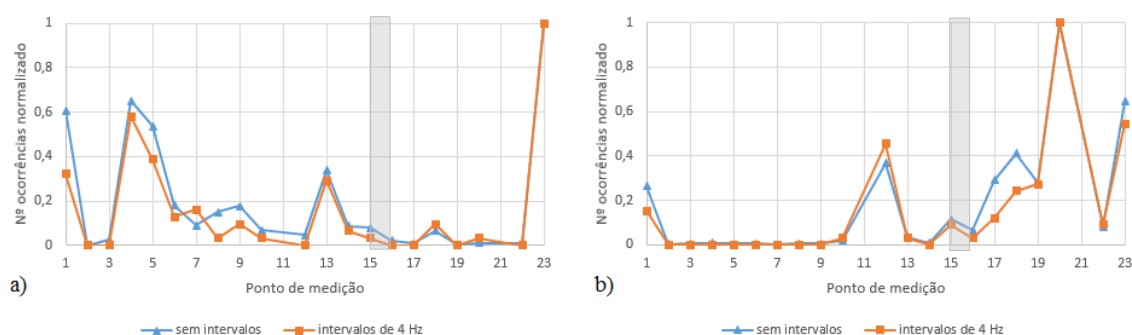


Figura 4.19- Efeito dos intervalos de frequência no indicador NRIFS no caso experimental (100-500 Hz) (a) força em 3 (b) força em 19

É verificado pela análise da Figura 4.19 que a utilização dos intervalos de frequência no indicador NRIFS apenas oferece uma diminuição na amplitude dos picos observados ao longo de toda a estrutura. No entanto a localização do dano não consegue ser obtida. A variação do indicador NRIFS resultante dos diferentes casos de excitação é impeditiva para a correta localização do dano, assim sendo o procedimento dos intervalos de frequência só é benéfico se a força aplicada permitir a correta localização do dano.

Na tentativa de contornar a restrição da localização da força aplicada é estudado o efeito do somatório de todas as forças envolvidas, a Figura 4.20 representa o resultado encontrado,

através de um gráfico com a contagem das ocorrências de NRIFS para cada ponto de medição ao longo da estrutura.

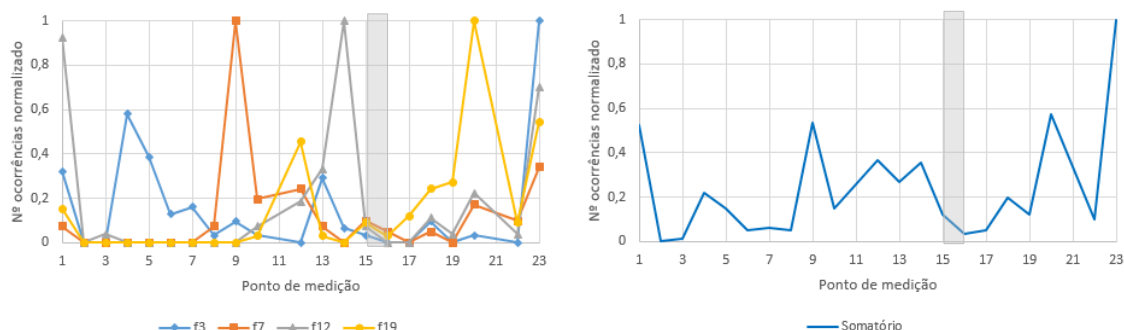


Figura 4.20- Resultado obtido pelo indicador NRIFS com o somatório das forças existentes no caso experimental (100-500 Hz)

No entanto, como observado pelos resultados obtidos, a variação do indicador ao longo da viga demonstra um comportamento distorcido (consultar ANEXO D para verificar o comportamento ao longo dos diversos níveis de dano). Para além da inconsistência do método, o número de ocorrências obtida nos extremos da viga não consegue ser explicada até à data.

4.3.3 CURVATURA DE RIFS

A aplicação das curvaturas das RIFS proposta por *Liu et al* [44] provou ser eficaz na modelação numérica, nesta secção é comprovado o comportamento do mesmo para ambiente experimental. O método utiliza as RIFS obtidas anteriormente, apesar do obstáculo relativo à variação dos resultados com a excitação implementada o mesmo será estudado para dois casos distintos. O primeiro aborda a situação onde a força surge no ponto 3 e o segundo caso onde a força é imposta no ponto 19.

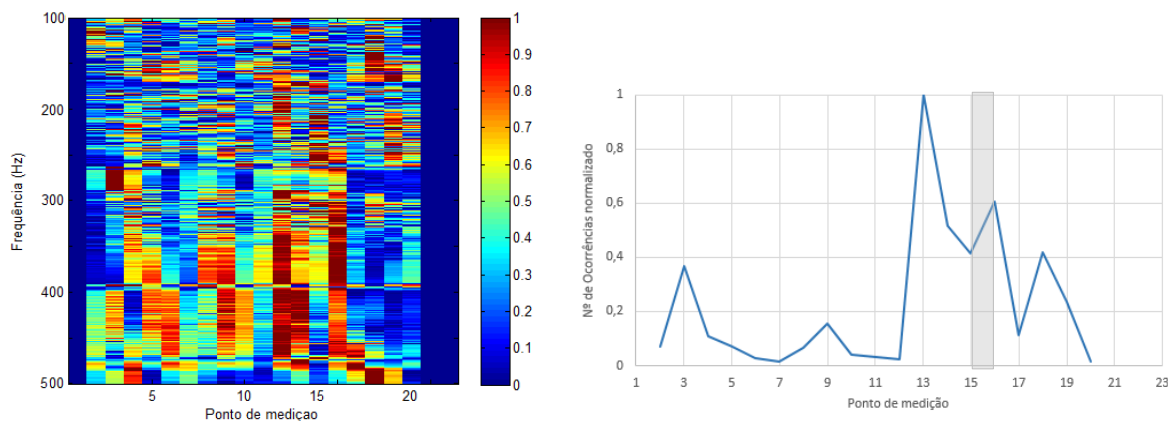


Figura 4.21- Mapa de distribuição das curvaturas das RIFS normalizadas e contagem de ocorrências para força 3

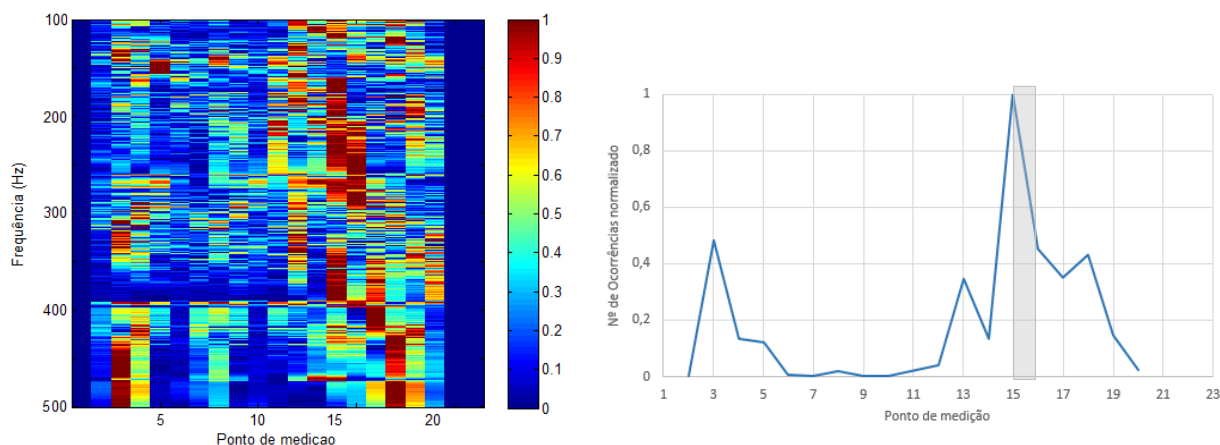


Figura 4.22- Mapa de distribuição das curvaturas das RIFS normalizadas e contagem de ocorrências para força 19

Com a implementação das curvaturas das RIFS a variação do indicador para o ponto onde é submetido o dano ao longo das frequências é inconstante. No entanto, ao contrário do verificado com o indicador NRIFS, com a variação da posição da força aplicada o método apresenta os seus máximos numa região vizinha à localização do dano. Para o caso onde a força é aplicada no ponto 3 (Figura 4.21) as curvaturas máximas são observadas no ponto de medição 13, para o caso em que a excitação é provocada em 19 (Figura 4.22), a posição do dano é dada no ponto 15, sendo que o dano se encontra localizado entre os pontos 15 e 16.

4.3.3.1 IMPLEMENTAÇÃO DOS INTERVALOS DE FREQUÊNCIA

Nesta etapa é apresentado o efeito da implementação dos intervalos de frequência nas curvaturas de RIFS. Tal como realizado para métodos anteriores é utilizado aqui 200 intervalos de frequência com amplitude de 4 Hz. Os resultados obtidos com a força aplicada em 3 e 19 numa estrutura danificada de nível 4 são apresentados de seguida.

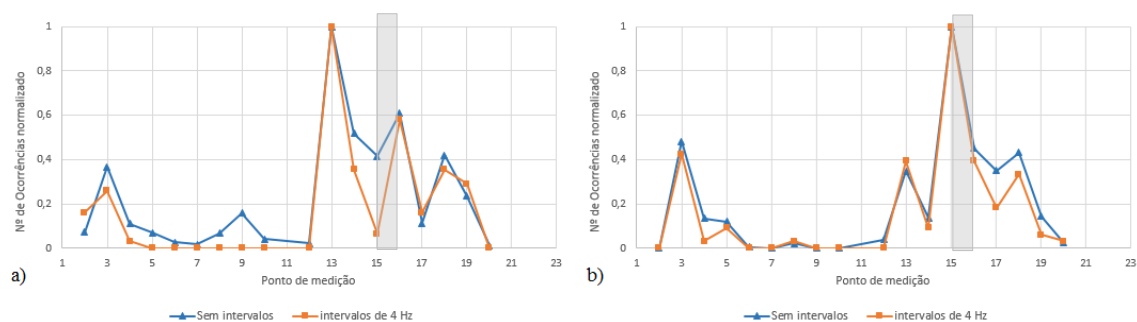


Figura 4.23- Efeito dos intervalos de frequência no indicador Curv_RIFS (a) força 3 (b) força 19

Com a análise da Figura 4.23 é possível verificar o efeito dos intervalos de frequência no método das curvaturas de RIFS. Com a implementação desta abordagem os diversos picos adjacentes diminuem a sua amplitude, no caso da Figura 4.23 a) apenas o valor máximo no ponto 13 não foi alterado. No caso da Figura 4.23 b), onde a força é aplicada em 19 surge os resultados mais satisfatórios, onde a localização do dano (ponto 15) é evidenciada sendo a amplitude nos restantes pontos de medição diminuída com este procedimento.

4.3.3.2 SOMATÓRIO DE FORÇAS E GAMA ÓTIMA

De modo a encontrar uma uniformização dos resultados para a aplicação do método é proposto o somatório das contribuições de todas as forças envolvidas no caso experimental (Figura 4.24). Posteriormente é estudado a distribuição das ocorrências de modo a encontrar uma gama de frequências ótima onde o método tenha um melhor comportamento (Figura 4.25).

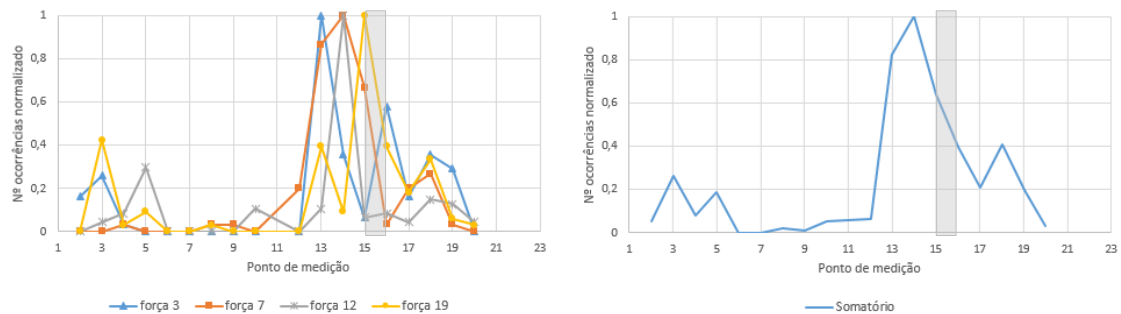


Figura 4.24- Aplicação do somatório das forças para curvaturas de RIFS (100-500 Hz)

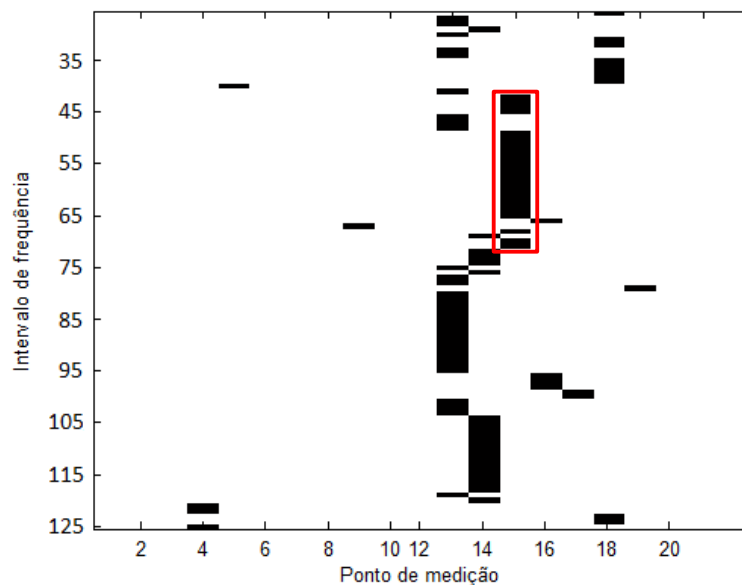


Figura 4.25- Distribuição das ocorrências (curvaturas máximas) de RIFS (somatório das forças envolvidas)

Com a análise da Figura 4.24 é verificado que o somatório das forças uniformiza o nível de ocorrências (curvaturas máximas normalizadas) encontrado, no entanto a localização dada pelo método no intervalo de 100-500 Hz aponta para o ponto 14. A distribuição ilustrada na Figura 4.25 consegue expandir a análise ao longo da viga, sendo verificado que o somatório dos resultados para todas as forças envolvidas consegue fornecer a região onde se encontra presente o dano (nomeadamente entre o ponto 13 e 15).

Para o aumento da sensibilidade é investigado o comportamento das curvaturas máximas para o ponto 15 e 16. Para além do ruído observado nos resultados, foi retirado um intervalo de frequência onde o método apresenta menor variação. No caso do ponto 15 ocorre um intervalo distinto, localizado entre o intervalo de frequência 38 e 68 (aproximadamente 150-270 Hz). Para o ponto 16 não se verifica nenhum patamar significativo na gama de frequências considerada. De modo a representar o método otimizado, onde a variação do indicador é constante para um ponto vizinho do dano, é escolhido a gama de frequências de 150-270 Hz. A gama de frequências adotada irá evidenciar a posição do dano para o ponto 15, tal é visível na Figura 4.26 (para outros níveis de dano consultar ANEXO D). É ainda de salientar que a escolha desta gama de frequências ótima, tal como realizado no indicador FRF_SC, só é possível pois já é conhecido a localização do dano estudado.

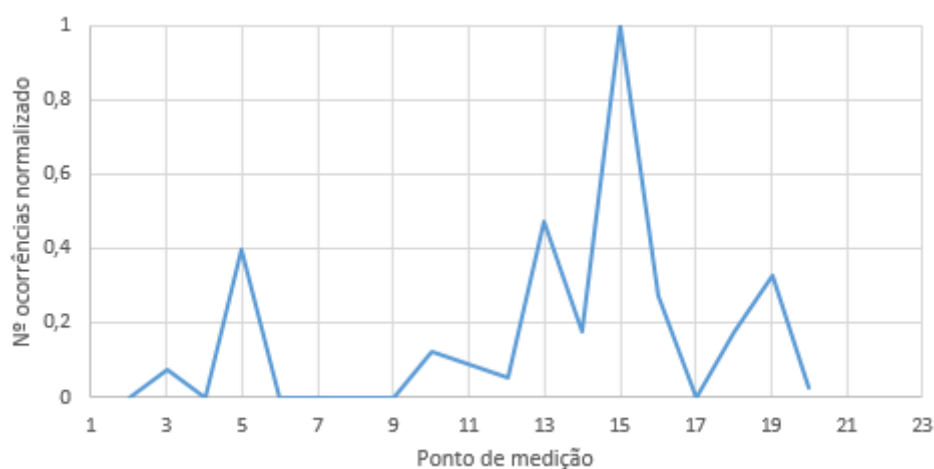


Figura 4.26-Método das curvaturas de RIFS otimizado (150-270 Hz)

5. CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo de desempenho de vários métodos de detecção e localização de dano que utilizam parâmetros modais, obtidos quer pela via numérica quer recorrendo a medições experimentais. Com este estudo foi possível analisar o comportamento das diversas metodologias em função da posição do ponto de aplicação da força, bem como a influência do ruído presente nas FRFs que são utilizadas pelos diversos métodos.

Para a detecção de dano verificou-se que:

- ✓ Indicadores como AIGAC e DRQ apenas conseguem detetar claramente o dano para níveis mais elevados. A sua sensibilidade ao ruído não é substancial, não afetando a eficiência dos mesmos.
- ✓ Para métodos que utilizam a correlação de modos de vibração (MAC, COMAC e MMSD), estes demonstram problemas na detecção/localização de dano pois a sua aplicação necessita de elevado número de pontos de medição de forma a descrever o modo de vibração com suficiente resolução.
- ✓ Indicadores que utilizam as transmissibilidades, nomeadamente o TDI e WDI conseguem demonstrar a presença de dano para estágios de dano mais precoces. O expoente presente no WDI consegue fornecer uma adaptação à necessidade da situação. Quanto à sensibilidade perante a presença de ruído, os mesmos não demonstram ser significativamente afetados. É ainda verificado o aumento da sensibilidade dos mesmos aquando a utilização de um maior número de forças.

Relativamente aos métodos de localização de dano, os ensaios realizados indicam três fatores determinantes para o sucesso da sua implementação, nomeadamente:

- ✓ Ruído – Para o caso numérico é aplicado um ruído branco de carácter aleatório, os métodos implementados sofrem com a presença do mesmo, no entanto, após a utilização de um novo procedimento, descrito como intervalos de frequência, o sucesso na localização de dano é alcançada. No caso experimental o ruído presente afeta os diversos indicadores, comprometendo a localização clara do dano existente. A implementação dos intervalos de frequência conseguiu melhorar os resultados obtidos, no entanto não foi suficiente para fornecer uma localização clara do dano.

- ✓ Gama de frequências – Este parâmetro mostrou-se essencial para a localização do dano, em ambiente experimental, através do método que utiliza o FRF_SC e as curvaturas de RIFS. Para a gama de frequências adotada (100-500 Hz) os mesmos indicam múltiplos picos máximos, indicando falsos positivos na localização do dano. Quando proposto o estudo da distribuição dos diversos indicadores ao longo da gama de frequências foi encontrado uma “gama ótima” que tornou possível a localização clara do dano, no entanto este procedimento não é viável para a monitorização contínua de uma estrutura.
- ✓ Número e localização de forças – Os métodos NRIFS, curvaturas de RIFS e o indicador FRF_SC com a contagem de ocorrências associadas verificam alterações no seu comportamento perante diferentes posições das forças aplicadas quando existe presença de ruído (provocado numericamente ou já presente no caso experimental). No entanto a utilização do somatório dos resultados com todas as forças envolvidas consegue uniformizar os resultados obtidos, indicando uma localização de dano coerente para o nível de dano testado (exceto com o indicador NRIFS em ambiente experimental).

Outro facto a relatar é a vantagem verificada na implementação da parte imaginária nos métodos de localização de dano. Perante as diferentes localizações das forças aplicadas o indicador FRF_SC, com a parte imaginária da receptância demonstrou menor variação, sendo capaz de reportar a localização clara do dano no caso numérico e oferecendo uma localização coerente no caso experimental.

5.2 TRABALHO FUTURO

Para além dos testes aqui realizados é interessante verificar o comportamento dos diversos métodos perante a presença de múltiplos danos. Outro alvo de estudo é a verificação da relação da gama de frequências ótima (150-270 Hz) encontrada para o método das curvaturas de RIFS e o facto de esta pertencer ao modo de vibração onde o ponto que possui o dano aplicado (entre 15 e 16) diz respeito a um nodo.

Outra questão que não foi respondida até à data é a existência de picos secundários na implementação do indicador NRIFS, foi verificado no caso numérico que ao aplicar a excitação no início da viga o pico secundário surge no outro extremo e vice-versa. No caso experimental a influência da força é notória, no entanto o efeito é contrário, o ponto sujeito à força é o ponto onde ocorre o pico secundário. Como tal é importante conhecer a razão para tais comportamentos.

É verificado com este trabalho que a existência de ruído nas medições provoca bastantes problemas na correta identificação do dano em estruturas. É ainda proposto neste trabalho uma nova metodologia para a diminuição dos efeitos do ruído. No entanto ainda é necessário o desenvolvimento de novas abordagens que consigam reduzir essa fonte de erro de modo a tornar possível a implementação dos diversos métodos de localização de dano.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] D. E. Bray e R. K. Stanley, *Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing and Service*. CRC Press, 1996.
- [2] A. Rytter, “Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures,” Aalborg University, Denmark, 1993.
- [3] N.-G. Park e Y. Park, “Identification of damage on a substructure with measured frequency response functions,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 10, pp. 1891–1901, Oct. 2005.
- [4] E. P. Carden e P. Fanning, “Vibration based condition monitoring: a review,” vol. 3, no. 4, pp. 355–377, 2004.
- [5] Y. J. Yan, L. Cheng, Z. Y. Wu, e L. H. Yam, “Development in vibration-based structural damage detection technique,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, no. 5, pp. 2198–2211, Jul. 2007.
- [6] S. Doebling, C. Farrar, M. Prime, e D. Shevits, “Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review,” Los Alabamos National Laboratory, USA, 1996.
- [7] J. Sinou, “A Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in the Measurement of Linear and Non-linear Vibrations,” in *Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control*, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systemes UMR-CNRS 551, 2009, pp. 643–702.
- [8] J. M. Lifshitz e A. Rotem, “Determination of Reinforcement Unbonding of Composites by a Vibration Technique,” *J. Compos. Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 412–423, Jul. 1969.
- [9] O. S. Salawu, “Detection of structural damage through changes in frequency: a review,” *Eng. Struct.*, vol. 19, no. 9, pp. 718–723, Sep. 1997.
- [10] J.-T. Kim e N. Stubbs, “Crack detection in beam-type structures using frequency data,” *J. Sound Vib.*, vol. 259, no. 1, pp. 145–160, Jan. 2003.
- [11] A. Messina, E. J. Williams, e T. Contursi, “Structural damage detection by a sensitivity and statistical-based method,” *J. Sound Vib.*, vol. 216, no. 5, pp. 791–808, Oct. 1998.
- [12] B. H. Koh e S. J. Dyke, “Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data,” *Comput. Struct.*, vol. 85, no. 3–4, pp. 117–130, Feb. 2007.
- [13] W. M. West, “Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an Orbiter test specimen,” presented at the IN: International Modal Analysis Conference, 4th, Los Angeles, CA, 1986, vol. 1, pp. 1–6.

- [14] N. Lieven e D. Ewins, "Spatial Correlation of Mode Shapes, the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC)," presented at the Proceedings of the 4th {IMAC} (International Modal Analysis Conference), 1988, pp. 690–695.
- [15] R. J. Allemang, "The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse," *Sound Vib.*, vol. 37, no. 8, pp. 14–23, 2003.
- [16] S. H. Yoo, H. K. Kwak, e B. S. Kim, "Detection and location of a crack in a plate using modal analysis," presented at the Proceedings of International Modal Analysis Conference (IMAC-XVII), Orlando, Florida, 1999, pp. 1902–1908.
- [17] Lam, H. F., J. M. Ko, e C. W. Wonk, "Detection of damage location based on sensitivity analysis," *Proc.-SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, pp. 1499–1499, 1995.
- [18] Y. K. Ho e D. Ewins, "On the structural damage identification with mode shapes," presented at the Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification & Structural Health Monitoring, Universidad Politecnica de Madrid, Spain, 2000, pp. 677–684.
- [19] A. A. Elshafey, H. Marzouk, e M. R. Haddara, "Experimental damage identification using modified mode shape difference," *J. Mar. Sci. Appl.*, vol. 10, no. 2, pp. 150–155, Jun. 2011.
- [20] A. K. Pandey, M. Biswas, e M. M. Samman, "Damage detection from changes in curvature mode shapes," *J. Sound Vib.*, vol. 145, no. 2, pp. 321–332, Mar. 1991.
- [21] N. Stubbs, J.-T. Kim, e C. R. Farrar, "Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm," presented at the Proceedings of the XIII International Modal Analysis Conference, Nashville, USA, 1995, pp. 210–210.
- [22] Z. Y. Shi, S. S. Law, e L. M. Zhang, "Structural damage localization from modal strain energy change," *J. Sound Vib.*, vol. 218, no. 5, pp. 825–844, Dec. 1998.
- [23] P. Cornwell, S. W. Doebling, e C. R. Farrar, "Application of the strain energy damage detection method to plate like structures," *J. Sound Vib.*, vol. 224, no. 2, pp. 359–374, Jul. 1999.
- [24] F. M. Hemez, *Theoretical and Experimental Correlation Between Finite Element Models and Modal Tests in the Context of Large Flexible Space Structures*. University Microfilms, 1993.
- [25] S. W. Doebling, C. R. Farrar, e M. B. Prime, "A summary review of vibration-based damage identification methods," *Shock Vib. Dig.*, vol. 30, no. 2, pp. 91–105, 1998.
- [26] E. Parloo, P. Guillaume, e M. Van Overmeire, "Damage assessment using mode shape sensitivities," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 17, no. 3, pp. 499–518, May 2003.
- [27] A. Yan e J.-C. Golinval, "Structural damage localization by combining flexibility and stiffness methods," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 12, pp. 1752–1761, Oct. 2005.
- [28] Z. Wang, R. M. Lin, e M. K. Lim, "Structural damage detection using measured FRF data," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 147, no. 1–2, pp. 187–197, Jul. 1997.

- [29] U. Lee e J. Shin, “A frequency response function-based structural damage identification method,” *Comput. Struct.*, vol. 80, no. 2, pp. 117–132, Jan. 2002.
- [30] J. V. Araújo dos Santos, C. M. Mota Soares, C. A. Mota Soares, e N. M. M. Maia, “Structural damage identification in laminated structures using FRF data,” *Compos. Struct.*, vol. 67, no. 2, pp. 239–249, Feb. 2005.
- [31] “Is Damage Location using Vibration Measurements Practical?” [Online]. Available: http://michael.friswell.com/PDF_Files/DAMAS97.html. [Accessed: 09-Jul-2013].
- [32] M. P. Limongelli, “Frequency response function interpolation for damage detection under changing environment,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 24, pp. 2898–2913, Nov. 2010.
- [33] I. Bovio, V. Massimo, e L. Lecce, “Innovative Method for Damage Identification and Structural Health Monitoring based on Vibration Measurements,” presented at the 9th European Conference on NDT, 2006.
- [34] W. Heylen e S. Lammens, “FRAC: a consistent way of comparing frequency response functions,” presented at the Proceedings of the Conference on Identification in Engineering Systems, 1996, pp. 48–57.
- [35] R. Pascual, J.-C. Golinval, and M. Razeto, “A frequency domain correlation technique for model correlation and updating,” presented at the Proceedings-SPIE The International Society for Optical Engineering, 1997, pp. 587–592.
- [36] D. Montalvao, N. M. M. Maia, e A. M. R. Ribeiro, “A Review of Vibration-based Structural Health Monitoring with Special Emphasis on Composite Materials,” *Shock Vib. Dig.*, vol. 38, no. 4, pp. 295–324, Jul. 2006.
- [37] W. Heylen, S. Lammens, e P. Sas, *Modal Analysis Theory and Testing*. Katholieke Universiteit Leuven, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Division of Production Engineering, Machine Design and Automation, 1997.
- [38] R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia, e J. M. M. Silva, “The Frequency Domain Assurance Criterion as a Tool for Damage Detection,” *Key Eng. Mater.*, vol. 245–246, pp. 69–76, 2003.
- [39] N. M. M. Maia, R. A. B. Almeida, A. P. V. Urgueira, e R. P. C. Sampaio, “Damage detection and quantification using transmissibility,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, no. 7, pp. 2475–2483, Oct. 2011.
- [40] C. Zang, M. I. Friswell, e M. Imregun, “Structural Health Monitoring and Damage Assessment Using Measured FRFs from Multiple Sensors, Part I: The Indicator of Correlation Criteria,” *Key Eng. Mater.*, vol. 245–246, pp. 131–140, 2003.
- [41] C. Zang, M. I. Friswell, e M. Imregun, “Structural Health Monitoring and Damage Assessment Using Measured FRFs from Multiple Sensors, Part II: Decision Making with RBF Networks,” *Key Eng. Mater.*, vol. 245–246, pp. 141–148, 2003.

- [42] N. M. M. Maia, J. M. M. Silva, E. A. M. Almas, e R. P. C. Sampaio, "Damage Detection in Structures: From Mode Shape to Frequency Response Function Methods," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 17, no. 3, pp. 489–498, May 2003.
- [43] N. M. M. Maia, J. M. M. Silva, e R. P. C. Sampaio, "Localization of Damage using Curvature of the Frequency Response Functions," presented at the IMAC XV - 15th International Modal Analysis Conference, 1997, vol. 3089, pp. 942–946.
- [44] X. Liu, N. A. J. Lieven, e P. J. Escamilla-Ambrosio, "Frequency response function shape-based methods for structural damage localisation," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, no. 4, pp. 1243–1259, May 2009.
- [45] S. Chesné e A. Deraemaeker, "Damage localization using transmissibility functions: A critical review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 38, no. 2, pp. 569–584, Jul. 2013.
- [46] N. M. M. Maia, A. P. V. Urgueira, e R. A. B. Almeida, "Whys and Wherefores of Transmissibility," in *Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments*, F. Beltran-Carbajal, Ed. InTech, 2011.
- [47] N. M. M. Maia, J. M. M. Silva, e A. M. R. Ribeiro, "The transmissibility concept in multi-degree-of-freedom systems," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, no. 1, pp. 129–137, Jan. 2001.
- [48] R. A. B. Almeida, A. P. V. Urgueira, e N. M. M. Maia, "Using Transmissibility to Detect and Quantify Structural Damage," presented at the Proceedings of International Conference on Engineering Dynamics (ICEDyn2011), Tavira, Algarve, Portugal, 2011.
- [49] P. Cawley e R. D. Adams, "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies," *J. Strain Anal. Eng. Des.*, vol. 14, no. 2, pp. 49–57, Apr. 1979.
- [50] A. K. Pandey e M. Biswas, "Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility," *J. Sound Vib.*, vol. 169, pp. 3–17, Jan. 1994.
- [51] Q. Chen, Y. W. Chan, K. Worden, e G. R. Tomlinson, "Structural fault detection using neural networks trained on transmissibility functions," presented at the Proceedings of the International Conference on Vibration Engineering, Beijin, China, 1994, pp. 456–466.
- [52] W. M. Hasan, "Crack detection from the variation of the eigenfrequencies of a beam on elastic foundation," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 52, no. 3, pp. 409–421, Oct. 1995.
- [53] M. J. Schulz, A. S. Naser, P. F. PAI, M. F. Linville, e J. Chung, "Detecting structural damage using transmittance functions," presented at the Proceedings-SPIE The International Society for Optical Engineering, 1997, pp. 638–644.
- [54] S. K. Thyagarajan, M. J. Schulz, e P. F. PAI, "Detecting structural damage using frequency response functions.," *J. Sound Vib.*, vol. 19, no. 9, pp. 162–170, 1998.
- [55] E. I. Shifrin e R. Ruotolo, "Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks," *J. Sound Vib.*, vol. 222, no. 3, pp. 409–423, May 1999.

- [56] R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia, e J. M. M. Silva, “Damage detection using the frequency-response-function curvature method,” *J. Sound Vib.*, vol. 226, no. 5, pp. 1029–1042, Oct. 1999.
- [57] L. M. Zhang, M. J. Schulz, A. S. Naser, F. Ferguson, e P. F. Pai, “Structural health monitoring using transmittance functions,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 13, no. 5, pp. 765–787, Sep. 1999.
- [58] Y.-S. Lee e M.-J. Chung, “A study on crack detection using eigenfrequency test data,” *Comput. Struct.*, vol. 77, no. 3, pp. 327–342, Jun. 2000.
- [59] C. P. Ratcliffe, “A Frequency and Curvature Based Experimental Method for Locating Damage in Structures,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 122, no. 3, pp. 324–329, Jan. 2000.
- [60] A. Morassi, “Identification of a crack in a rod based on changes in a pair of natural frequencies,” *J. Sound Vib.*, vol. 242, no. 4, pp. 577–596, May 2001.
- [61] R. P. C. Sampaio, N. M. M. Maia, A. M. R. Ribeiro, e J. M. M. Silva, “Transmissibility techniques for damage detection,” presented at the Proceedings of the International Modal Analysis Conference, 2001, vol. 2, pp. 1524–1527.
- [62] E. Parloo, P. Verboven, P. Guillaume, e M. Van Overmeire, “Sensitivity-based operational mode shape normalisation,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 16, no. 5, pp. 757–767, Sep. 2002.
- [63] J.-T. Kim, Y.-S. Ryu, H.-M. Cho, e N. Stubbs, “Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method,” *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 1, pp. 57–67, Jan. 2003.
- [64] S. Vanlanduit, E. Parloo, e P. Guillaume, “Combined damage detection techniques,” *J. Sound Vib.*, vol. 266, no. 4, pp. 815–831, Sep. 2003.
- [65] D. Selcuk, “Structural Damage detection using frequency response functions,” Texas A&M University, USA, 2005.
- [66] N. M. M. Maia, J. V. Araújo dos Santos, R. P. C. Sampaio, e C. A. Mota Soares, “Damage Identification Using Curvatures and Sensitivities of Frequency-Response-Functions,” in *Structural Health Monitoring 2006: Proceedings of the Third European Workshop*, DEStech Publications, Inc, 2006, pp. 547–554.
- [67] E. Reynders e G. De Roeck, “A local flexibility method for vibration-based damage localization e quantification,” *J. Sound Vib.*, vol. 329, no. 12, pp. 2367–2383, Jun. 2010.
- [68] A. Tomaszewska, “Influence of statistical errors on damage detection based on structural flexibility and mode shape curvature,” *Comput. Struct.*, vol. 88, no. 3–4, pp. 154–164, Feb. 2010.
- [69] M. Radzieński, M. Krawczuk, e M. Palacz, “Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, no. 6, pp. 2169–2190, Aug. 2011.

- [70] Q. W. Yang e B. X. Sun, "Structural damage identification based on best achievable flexibility change," *Appl. Math. Model.*, vol. 35, no. 10, pp. 5217–5224, Oct. 2011.
- [71] Q. Huang, Y. L. Xu, J. C. Li, Z. Q. Su, e H. J. Liu, "Structural damage detection of controlled building structures using frequency response functions," *J. Sound Vib.*, vol. 331, no. 15, pp. 3476–3492, Jul. 2012.
- [72] V. B. Dawari e G. R. Vesmawala, "Modal Curvature and Modal Flexibility Methods for Honeycomb Damage Identification in Reinforced Concrete Beams," *Procedia Eng.*, vol. 51, pp. 119–124, 2013.
- [73] M. Cao, M. Radziński, W. Xu, e W. Ostachowicz, "Identification of multiple damage in beams based on robust curvature mode shapes," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 46, no. 2, pp. 468–480, Jun. 2014.

7. ANEXOS

ANEXO A

Apresentação dos resultados obtidos com o indicador FRF_SC na situação com ruído para diferentes níveis de dano, com a utilização da parte real e imaginária isoladamente quando a força se encontra aplicada em 3 (de notar que os gráficos expostos já incluem a utilização de intervalos de frequência de 4 Hz).

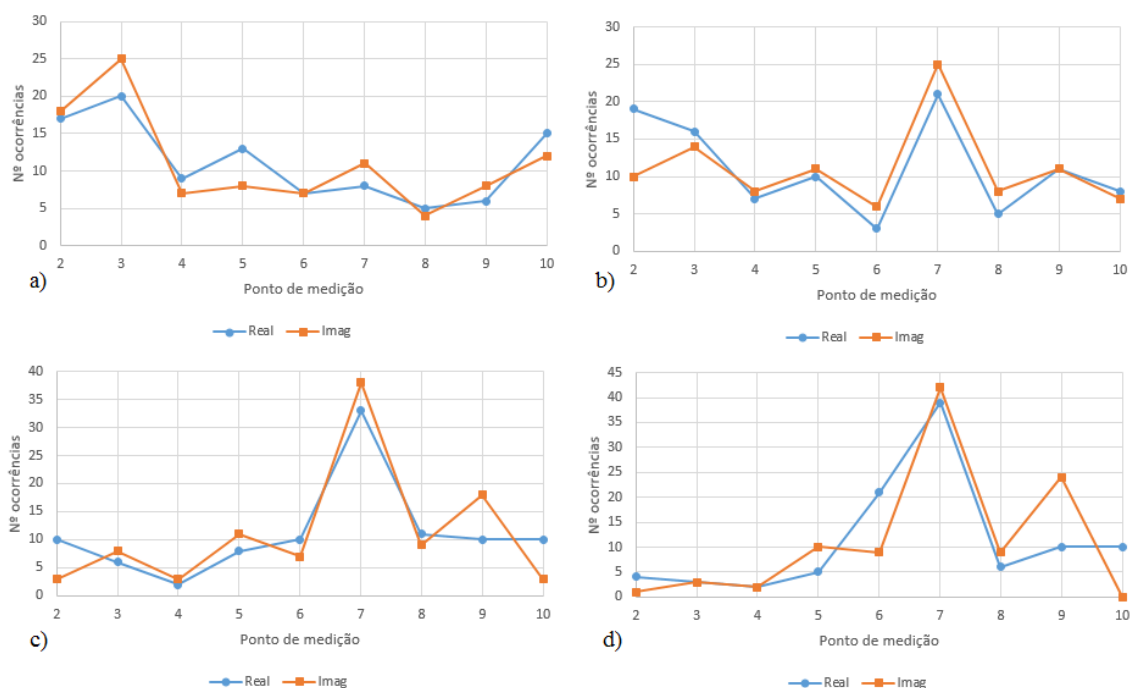


Figura A.1-Resultados obtidos com o indicador FRF_SC com a utilização da parte real e imaginária da receptância (isoladamente) (a) 5% (b) 10% (c) 30% (d) 50% de dano

ANEXO B

Apresentação dos resultados obtidos com o método NRIFS para frequências naturais e o efeito da aplicação da segunda derivada (na situação sem ruído), aquando a aplicação da força no ponto 3 na situação de 10% de dano:

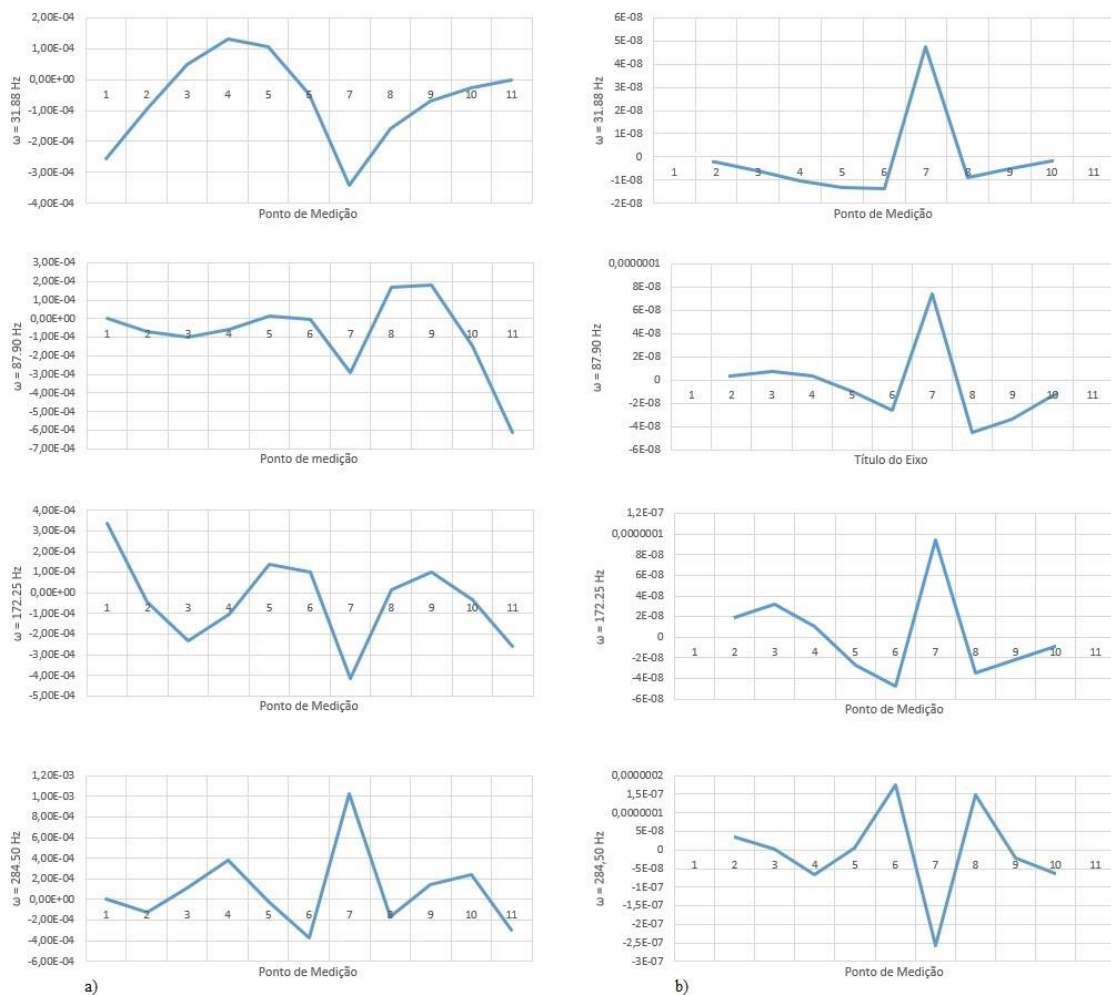


Figura B.1-Resultados obtidos com o indicador (a) RIFS (b) Curv_RIFS nas frequências naturais

ANEXO C

Apresentação dos resultados obtidos com o indicador FRF_SC com ocorrências associadas para diferentes níveis de dano aquando a aplicação da força em 19 (100-500 Hz) com a utilização da metodologia dos intervalos de frequência de 4 Hz.

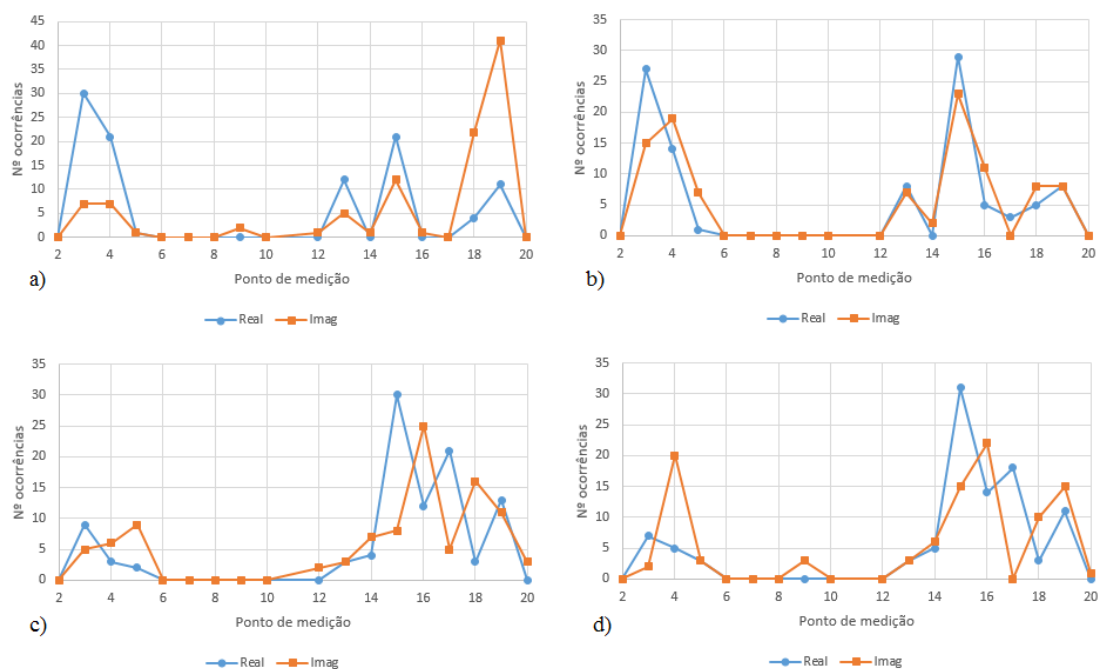


Figura C.1- Resultados obtidos com indicador FRF_SC para nível de dano (a)D02 (b) D04 (c) D06 (d) D08

ANEXO D

Apresentação dos resultados obtidos do método NRIFS e Curv_RIFS para diferentes níveis de dano aplicados na estrutura (os métodos apresentam a metodologia do somatório das forças envolvidas)

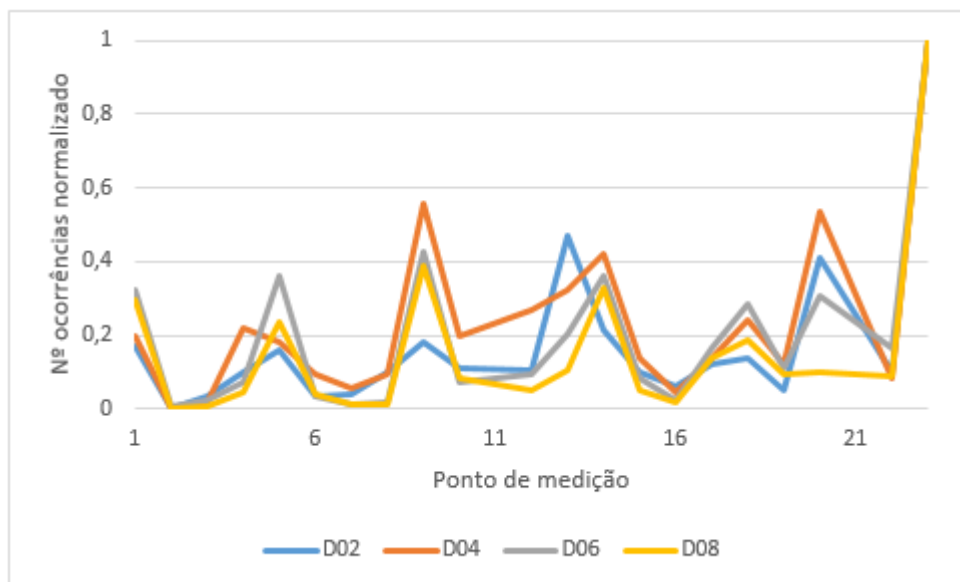


Figura D.1- Variação do indicador NRIFS para diferentes níveis de dano (100-500 Hz)

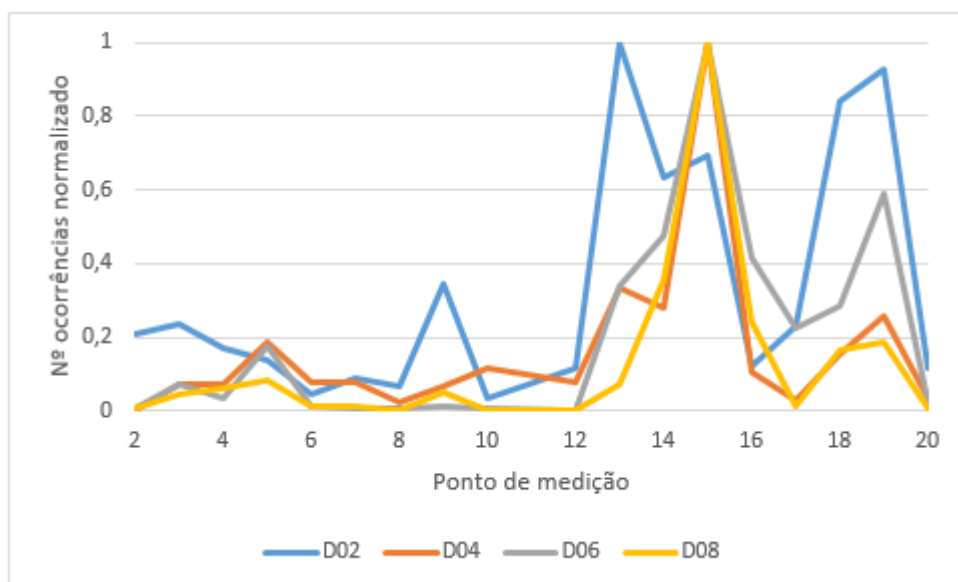


Figura D.2- Variação do indicador CURV_RIFS para diferentes níveis de dano (150-270 Hz)